

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2024, Том 11, № 4 / 2024, Vol. 11, Iss. 4 <https://t-s.today/issue-4-2024.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/02SATS424.pdf>

DOI: 10.15862/02SATS424 (<https://doi.org/10.15862/02SATS424>)

2.1.5. Строительные материалы и изделия (технические науки)

УДК 691.32:620.17

Особенности контроля прочности бетона с карбонизированным слоем

Томилов С.Н.

ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Томилов Сергей Николаевич, e-mail: serg_tomilov@mail.ru

Аннотация. В процессе содержания железобетонных конструкций различного назначения периодически возникает необходимость их обследования с целью установления текущих потребительских свойств, меняющихся со временем. Одним из таких свойств является прочность бетона. Оценка фактической прочности затвердевшего бетона всегда была и есть одним из ключевых пунктов жизненного цикла бетонных и железобетонных конструкций как на этапе ввода новых сооружений, так и в разном возрасте в процессе эксплуатации.

При контроле прочности бетона эксплуатируемых конструкций в объеме подвергнутого испытанию участка практически всегда будет внешний карбонизированный слой бетона, глубина которого зависит от возраста конструкции и внешних условий. Полагая отличие физико-механических свойств карбонизированного слоя от основного неповрежденного бетона, можно сделать вывод о необходимости учета такого обстоятельства для корректной оценки прочности основного бетона конструкции.

Целью данной статьи является обзор отечественного и зарубежного опыта испытания бетона методом отрыва со скалыванием, анализ подходов к оценке прочности карбонизированного бетона, составление расчетной схемы испытания с учетом различных физико-механических свойств карбонизированного и основного неповрежденного бетона.

В результате работы автором проанализирована и обобщена оценка критерия полной карбонизации и установления ее границ, проанализирован подход к определению показателя прочности карбонизированного бетона, предложена расчетная схема испытания методом отрыва со скалыванием, по которой можно вычислить показатель прочности основного неповрежденного карбонизацией бетона.

Ключевые слова: отрыв со скалыванием; вырываемый фрагмент; карбонизированный бетон; критерий карбонизации; граница карбонизации; индикаторный метод; прочность бетона

Features of concrete strength control with a carbonated layer

Sergey N. Tomilov

Pacific National University, Khabarovsk, Russia

Corresponding author: Sergey N. Tomilov, e-mail: serg_tomilov@mail.ru

Abstract. In the reinforced concrete structures maintenance process of various purposes, there periodically arises a necessity for inspections to establish the current consumer properties, which change over time. One such property is the durability of concrete. The assessment of the actual durability of hardened concrete has always been and remains one of the key points in the life cycle of concrete and reinforced concrete structures, both at the stage of bringing into operation new facilities and at various ages during operation.

When controlling the durability of concrete in operational structures, there will almost always be an external carbonated layer of concrete on the tested area, the depth of which depends on the age of the structure and external conditions. Assuming a difference in the physical and mechanical properties of the carbonated layer compared to the intact main concrete, one can conclude on the necessity to consider this circumstance for a correct durability assessment of the main concrete in the structure.

The aim of this paper is to review domestic and foreign experience in testing concrete using the shear test method, analyze approaches to assessing the durability of carbonated concrete, and develop a testing scheme that takes into account various physical and mechanical properties of both carbonated and intact main concrete.

As a result of this work, the author has analyzed and summarized the evaluation criteria for complete carbonation and established its boundaries, analyzed the approach to determining the durability indicator of carbonated concrete, and proposed a testing scheme using the shear test method, which allows for calculating the strength indicator of intact concrete unaffected by carbonation.

Keywords: shear test; extracted fragment; carbonised concrete; carbonisation criterion; carbonisation boundary; indicator method; concrete durability

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



Введение

Introduction

По ГОСТ 18105-2018¹ методы контроля прочности бетона делят на разрушающие и неразрушающие. Разрушающими и наиболее точными являются методы определения прочности бетона по контрольным образцам, изготовленным из бетонной смеси по ГОСТ 10180-2012² или отобранным из конструкций по ГОСТ 28570-2019³ [1]. Испытания контрольных образцов приемлемы для новых изделий и конструкций, когда такие образцы готовятся в процессе строительства и твердеют в одинаковых условиях с бетоном контролируемой конструкции. При производственном контроле прочности бетона, а также при обследованиях, инспекционных и экспертных испытаниях прочности бетона в конструкциях при отборе образцов (кернов) из конструкций возникает необходимость их маркировки, хранения, транспортировки в лабораторию, оснащенную необходимым оборудованием. Да и сам процесс отбора, как правило кернов, требует специального оборудования, сложен или невозможен в труднодоступных местах и чреват повреждением арматуры и самого образца [2]. Так, ГОСТ 28570-2019³ определяет базовый размер отбираемого керна диаметром 150 мм и высотой 150 мм для испытаний на сжатие и растяжение, а, например, толщина железобетонных конструкций пролетных строений мостов (плиты ездового полотна, ребер главных балок) немногим более размеров кернов, что означает нарушение целостности конструкции, а интенсивность армирования таких конструкций почти не оставляет возможность найти место для отбора керна без повреждения армирования и попадания арматурного фрагмента в контрольный образец. Контрольные образцы испытывают на сжатие и растяжение, но для возрастного бетона прямые испытания отобранных кернов на растяжение зачастую дают некорректные результаты, так что все равно прибегают к косвенному методу через испытания образцов опять же на сжатие или изгиб [3]. Если в бетоне есть карбонизированный слой, он будет и в кернах, следовательно, и испытания их не только на растяжение, но и на сжатие могут дать некорректные результаты. Таким образом, преимущество контроля прочности бетона по отбираемым контрольным образцам как прямого метода испытаний для возрастного бетона эксплуатируемых

¹ ГОСТ 18105-2018. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности / Межгосударственный стандарт. М.: Стандартинформ, 2019. 16 с.

² ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам / Межгосударственный стандарт. М.: Стандартинформ, 2013. 36 с.

³ ГОСТ 28570-2019. Бетоны. Определение прочности по образцам, отобранным из конструкций / Межгосударственный стандарт. М.: Стандартинформ, 2019. 16 с.

конструкций, как правило, имеющего карбонизированный слой, становится неочевидным.

Инструментальная оценка прочности бетона сооружений в процессе их эксплуатации не должна приводить к повреждениям конструктивных элементов последних, для чего в отечественных и зарубежных нормах предусмотрено применение неразрушающих методов контроля прочности бетона при локальном механическом воздействии — удар, упругий отскок, вдавливание, отрыв, скол, отрыв со скалыванием. Если не считать метода лабораторных испытаний отбираемых из конструкций контрольных образцов (кернов) со всеми его недостатками и ограничениями, то как более достоверный наибольшее распространение получил метод отрыва со скалыванием, так как он вовлекает в процесс испытания не только поверхность, но и глубинный слой бетона.

Методы неразрушающего контроля прочности бетона

Methods of non-destructive control of concrete durability

Для контроля прочности бетона эксплуатируемых железобетонных конструкций получили распространение механические неразрушающие методы по ГОСТ 22690-2015⁴ при локальном воздействии на бетон конструкций или образцов без их общего разрушения, основанные на связи косвенных показателей и прочности бетона, а также ультразвуковой метод по ГОСТ 17624-2021⁵, не оказывающий на конструкцию какого-либо механического воздействия. Косвенные неразрушающие методы контроля прочности бетона, такие как метод упругого отскока, пластической деформации, ударного импульса, основаны на взаимодействии с поверхностью бетона и могут свидетельствовать лишь о его поверхностных свойствах [2; 4]. Что касается европейских норм, оценку прочности бетона по критерию отскока регламентирует EN 12504-2:2001⁶ и в достаточной степени соотносится с ГОСТ 22690-2015⁴, а норматив EN 12504-4:2021⁷ регламентирует ультразвуковой метод, при котором также, как и в ГОСТ 17624-2021⁵, определяющим параметром является скорость прохождения ультразвукового импульса через массив бетона.

⁴ ГОСТ 22690-2015. Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля / Межгосударственный стандарт. М.: Стандартинформ, 2016. 20 с.

⁵ ГОСТ 17624-2021. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности / Межгосударственный стандарт. М.: Российский институт стандартизации, 2022. 13 с.

⁶ EN 12504-2:2001. Testing concrete in structures — Part 2: Non-destructive testing — Determination of rebound number. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.

⁷ EN 12504-4:2021. Testing concrete in structures — Part 4: determination of ultrasonic pulse velocity. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.

Ультразвуковой метод определения прочности бетона является косвенным неразрушающим и основан на связи прочности бетона со скоростью (временем) прохождения ультразвуковых волн через тело бетонного элемента, следовательно, характеризует не только поверхностный слой, но весь массив бетона, расположенный между источником и приемником ультразвукового импульса. Но результат при этом зависит от внутренних каверн, трещин, наличия арматуры [2]. К тому же результативность ультразвукового метода критично зависит от точности установления расстояния между отдельными источником и приемником сигнала.

Прямыми неразрушающими методами контроля прочности бетона по ГОСТ 22690-2015⁴ являются методы отрыва, отрыва со скалыванием, скалывания ребра. В отечественной и зарубежной практике наиболее распространен метод отрыва со скалыванием [1; 5; 6], основанный на корреляции усилия выдергивания анкерного устройства с прочностью бетона при сжатии и, хотя отнесен к прямому методу, требует использования градуировочных зависимостей [1; 5; 6], рекомендуемых ГОСТ 22690-2015⁴.

Контроль прочности бетона методом отрыва со скалыванием по опыту автора, а также свидетельствам отечественных [1; 5] и зарубежных специалистов [6] является наиболее достоверным из неразрушающих и по этому критерию может уступать разве что лабораторным испытаниям кернов при освидетельствовании эксплуатируемых конструкций. Описанные выше сложности и ограничения отбора кернов оставляют явные преимущества — минимальные и некритичные повреждения конструкции, низкая трудоемкость и высокая производительность проведения испытаний, возможность работы в труднодоступных местах — методу отрыва со скалыванием, который при достаточном обосновании может дополняться выемкой и испытанием кернов [6] или сочетаться с ультразвуковым методом [1].

Отечественную практику метода отрыва со скалыванием регламентирует ГОСТ 22690-2015⁴, а из зарубежных — американский стандарт ASTM C900-19⁸ и европейский EN 12504-3:2005⁹. Процесс испытания заключается в выдергивании с помощью специального устройства с механическим или гидравлическим приводом из элемента конструкции закрепленного в нем анкерного устройства вместе с конусообразным фрагментом бетона и фиксацией с помощью силоизмерителя возникающего при этом усилия с последующим

⁸ ASTM C900-19. Standard Test Method for Pullout Strength of Hardened Concrete. ASTM, Philadelphia, USA.

⁹ EN 12504-3:2005. Testing concrete in structures — Part 3: Determination of pull-out force. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.

применением градуировочной зависимости, переводящей усилие выдергивания анкерного устройства к показателю прочности бетона при сжатии. Отличия зарубежной и отечественной практики такого испытания заключаются в конфигурации и способе заделки в бетон анкера, а также в конструкции выдергивающего устройства.

Рассмотрим вначале зарубежный опыт. Так, в соответствии с ASTM C900-19⁸ предусматривается два способа заделки анкерного устройства — омоноличиванием при укладке бетонной смеси на этапе изготовления конструкции (LOK-TEST) или забуриванием в твердый бетон готовой конструкции анкера (CAPO-TEST) (рис. 1).

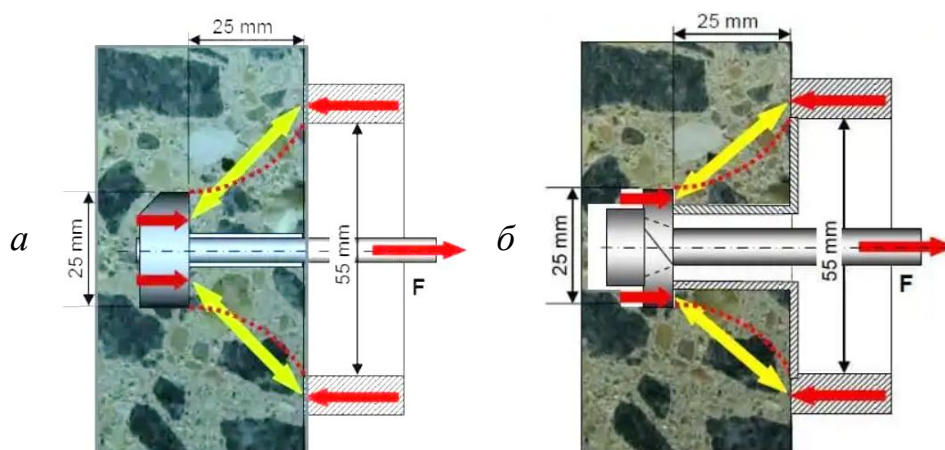


Рисунок 1. Схема испытаний: (а) LOK-test; (б) CAPO-test (источник: [6])

Figure 1. Testing Scheme: (a) LOK-test; (b) CAPO-test (source: [6])

Особенностью представленной на рисунке 1 схемы испытаний по нормам ASTM C900-198 и EN 12504-3:20059 является то, что выдергивающее устройство имеет упорное кольцо внутренним диаметром 55 мм (рис. 1), которое ограничивает диаметр подошвы вырываемого фрагмента бетона, формируя его в почти идеальный конус (рис. 2), но при этом исключая возможность свободного формирования поверхности отрыва, которая могла бы выходить на площадку поверхности бетона размером больше, чем 55 мм.



Рисунок 2. Правильная коническая форма вырванного фрагмента бетона при испытании по схеме LOK-test (источник: [6])

Figure 2. Correct conical shape of the excavated concrete fragment in LOK-test (source: [6])

По обоим приведенным на рисунке 1 схемам на конце стержня анкера имеется диск диаметром 25 мм, между которым и упорным кольцом выдергивающего устройства бетон при извлечении анкера испытывает сжатие, что позиционируется как достоинство метода, так как в итоге необходим показатель прочности бетона при сжатии. Но кроме напряжений сжатия, по боковой поверхности конуса при отрыве возникают и растягивающие, и скалывающие напряжения, так что имеем сложное напряженное состояние, требующее для увязки усилия отрыва фрагмента бетона с его прочностью при сжатии применение градуировочных зависимостей.

Отечественная практика применения метода отрыва со скалыванием, основанная на ГОСТ 22690-2015⁴, также предполагает заблаговременную установку анкера при бетонировании или закрепление его в пробуренном отверстии в твердом бетоне, но нагружающее устройство упорного кольца не имеет, что дает возможность свободного формирования вырываемого фрагмента, при этом правильной конической формы у вырываемого фрагмента бетона не получается, рисунок 3. Размеры подошвы конического фрагмента могут быть ограничены лишь опорами нагружающего устройства, расположение которых от центра анкерного устройства должно быть не менее двойной рабочей глубины его заделки по ГОСТ 22690-2015⁴, что при стандартных размерах рабочей глубины анкерных устройств 35 и 48 мм составит соответственно 70 и 96 мм а возможный диаметр основания конуса вырываемого фрагмента — до 140 или до 192 мм.



Рисунок 3. (а) нагружающее устройство ПОС-50МГ4;
(б) свободная форма вырываемого фрагмента (фото автора)

Figure 3. (a) POS-50MG4 loading device;
(b) free form of the extracted fragment (author's photo)

Карбонизированный бетон, его границы и прочность

Carbonised concrete, its boundaries and durability

Если методы поверхностного механического воздействия с применением склерометров различного типа могут показать свойства

поверхностного карбонизированного слоя бетона независимо от его толщины, то метод отрыва со скалыванием выделяет конический фрагмент бетона, содержащий карбонизированный и основной неповрежденный его слой.

В оценке глубины карбонизированного слоя лежит исследование диффузионной проницаемости бетона для углекислого газа. В соответствии с ГОСТ 31383-2008¹⁰ глубина карбонизации определяется эффективным коэффициентом диффузии углекислого газа в бетоне и концентрацией его в воздухе, реакционной емкостью бетона, сроком эксплуатации, что подтверждается и получает развитие рядом исследований [7; 8]. Однако теоретический подход к определению глубины карбонизации требует проведения испытаний для установления параметров, входящих в расчетные формулы, что больше подходит к прогнозированию процесса карбонизации.

При обследовании сооружений с проведением испытаний бетона неразрушающим методом основой определения глубины карбонизации бетона как в отечественной, так и зарубежной практике является фенолфталеиновый тест [9–12] как индикатор водородного показателя pH, являющегося мерой кислотности цементного камня. Переход окраски фенолфталеина из малиновой в бесцветную характеризует границу перехода щелочной среды в кислую при $\text{pH} = 8 \div 10$ [10], зона резкого перехода цвета индикатора отмечена при $\text{pH} \approx 10,3$ [11], а бетон полностью теряет свои защитные свойства относительно арматуры при $\text{pH} = 9$ [8] и считается полностью карбонизированным при $\text{pH} = 9$ и ниже [12].

Таким образом, для практической оценки границы полной карбонизации бетона можно считать измеренную глубину перехода цвета фенолфталеинового индикатора (рис. 4).

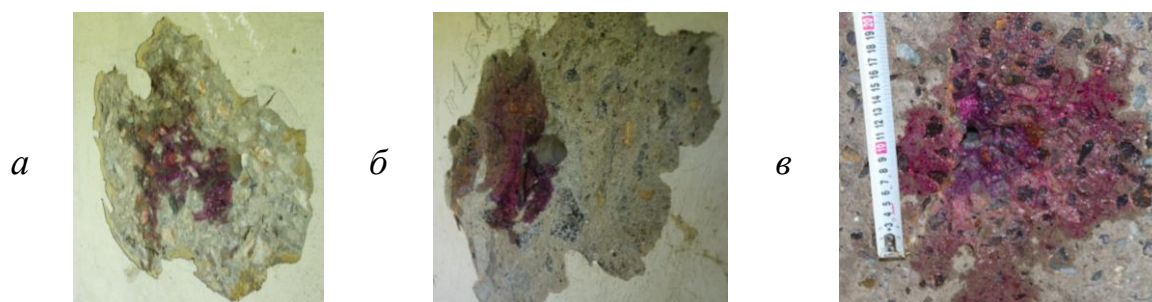


Рисунок 4. Фенолфталеиновый тест поверхности бетона после испытания методом отрыва со скалыванием: (а) карбонизация 9 мм; (б) карбонизация 6 мм; (в) карбонизации нет (фото автора)

Figure 4. Phenolphthalein test of the concrete surface after testing by the shear test method: (a) carbonisation 9 mm; (b) carbonisation 6 mm; (c) no carbonisation (author's photo)

¹⁰ ГОСТ 31383-2008. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Методы испытаний / Межгосударственный стандарт. М.: Стандартинформ, 2010. 34 с.

В комплексе факторов влияния на показания силоизмерителя нагружающего устройства, реализующего метод отрыва со скалыванием, кроме положения границы полной карбонизации важен показатель прочности карбонизированного бетона.

В оценке прочности карбонизированного бетона определяющей считают зону контакта между заполнителем и цементным камнем, прочность сцепления по которой уменьшается с увеличением содержания влаги, выделяющейся в процессе карбонизации [13]. Также карбонизацию называют коррозией бетона, влекущую его разрушение [14]. Процесс взаимодействия бетона с углекислым газом (карбонизация) вызывает изменение структуры цементного камня и его деградацию [15]. Снижение прочности цементного камня обусловлено изменением фазового состава продуктов гидратации — выделение свободной воды приводит к снижению объема твердой фазы в карбонизированном цементном камне и снижению его прочности [16]. Если оценивать водородный показатель pH, опытными исследованиями установлено, что с увеличением щелочности (рост pH) прочность бетона растет, а с ростом кислотности (уменьшение pH — карбонизация) прочность снижается [12].

В 1997 году профессор МАДИ А.А. Потапкин предложил формулу прочности карбонизированного бетона [17]:

$$R_k = R_{\text{осн}} \cdot \exp(-0,175 \cdot h_k), \quad (1)$$

где $R_{\text{осн}}$ — прочность основного неповрежденного бетона; h_k — глубина карбонизации, см.

Представим формулу (1) как:

$$R_k = \beta \cdot R_{\text{осн}}, \quad (2)$$

где $\beta = \exp(-0,175 \cdot h_k)$ — коэффициент, корректирующий основной показатель прочности бетона.

Связь корректирующего коэффициента β в (2) с глубиной карбонизации h_k отражена в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Влияние глубины карбонизации на снижение прочности бетона

Effect of carbonization depth on concrete durability reduction

Глубина карбонизации, мм <i>Carbonization depth, mm</i>	Коэффициент β <i>Coefficient β</i>	Размер снижения прочности <i>Size of durability reduction</i>
5	0,916	8,4 %
10	0,839	16,1 %
15	0,769	23,1 %
20	0,705	29,5 %
25	0,646	35,4 %
30	0,592	40,8 %
35	0,542	45,8 %

Разработано автором / Developed by the author

Представим фактическую глубину карбонизации бетона по результатам обследований и испытаний фенолфталеиновым тестом ряда железобетонных конструкций автодорожных мостов возрастом 36–47 лет

Таблица 2 / Table 2

Глубина карбонизации бетона на исследованных объектах

Depth of concrete carbonization at the investigated objects

Глубина карбонизации, мм Carbonization depth, mm	0–10	11–20	21–25	26–30	31–35
Число испытаний, шт./% Number of tests, pcs / %	23/57,5	10/25,0	3/7,5	3/7,5	1/2,5

Разработано автором / Developed by the author

По данным таблицы 2 подавляющее количество обследований (82,5 %) показали глубину карбонизации до 20 мм, что по формулам (1, 2) и таблице 1 соответствует снижению прочности бетона на 8,4–29,5 %, в среднем на 19 %.

Для сравнения приведем данные исследований последних лет, где отмечено, что при карбонизации цементный камень теряет от 10 до 20 % прочности [16], а проведенными лабораторными испытаниями установлено, что при уменьшении показателя рН с 13,5 до 5,5 (соответствует полной карбонизации) прочность бетонных образцов снизилась на 19,6 % [12].

**Схема метода отрыва со скалыванием
при наличии слоя карбонизированного бетона**

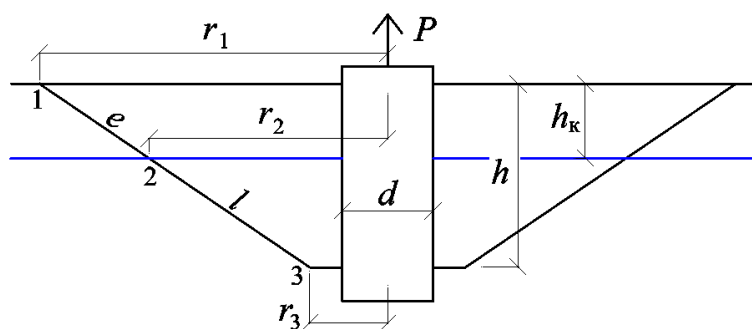
Scheme of testing concrete for pulling out in the presence of a carbonized layer

Высоту конической формы вырываемого фрагмента определяет рабочая глубина заделки анкерного устройства, а толщину карбонизированного слоя следует определять фенолфталеиновым тестом на месте испытания сразу после отрыва конического фрагмента по его поверхности и поверхности образовавшегося «кратера».

Рабочая глубина анкерных устройств, устанавливаемых в предварительно подготовленные в конструкции отверстия, составляет 35 или 48 мм при диаметрах 16 и 24 мм соответственно по ГОСТ 22690-2015⁴.

Для оценки влияния карбонизированного слоя на общий результат используем схему, основанную на модели испытания методом отрыва со скалыванием [5] (рис. 5).

На рисунке 5 показаны: h — рабочая глубина заделки анкерного устройства; d — диаметр анкерного устройства; h_k — глубина карбонизации. Вырываемый фрагмент бетона геометрически представляется состоящим из двух усеченных конусов с образующими e , l и радиусами оснований r_1 , r_2 , r_3 .



1, 2, 3 — точки разграничения усеченных конусов карбонизированного (1-2) и основного (2-3) бетона в составе вырываемого фрагмента; e — длина образующей усеченного конуса фрагмента карбонизированного бетона; l — длина образующей усеченного конуса фрагмента основного бетона

1, 2, 3 — boundary points of the frustums of carbonated (1-2) and main (2-3) concrete within the extracted fragment; e — length of the generatrix of the frustum of the carbonated concrete fragment; l — length of the generatrix of the frustum of the main concrete fragment

Рисунок 5. Схема метода отрыва со скалыванием при наличии карбонизированного слоя (источник: [5] с изменениями автора)

Figure 5. Schematic diagram of the shear test method in the presence of carbonised layer (source: [5] as modified by the author)

Степень влияния показателей прочности карбонизированного и основного бетона на общий результат испытания примем пропорционально площадям боковой поверхности соответствующих усеченных конусов, которые рассчитывают по формулам:

$$S_k = \pi \cdot e \cdot (r_1 + r_2); \quad S_{\text{осн}} = \pi \cdot l \cdot (r_2 + r_3), \quad (3)$$

где S_k — площадь боковой поверхности усеченного конуса фрагмента карбонизированного бетона; $S_{\text{осн}}$ — площадь боковой поверхности усеченного конуса фрагмента основного неповрежденного карбонизацией бетона.

Величины h_k , r_1 и r_3 измеряют на месте испытаний, остальные размеры на рисунке 5 вычисляют, зная параметры h и d анкерного устройства.

Величину r_1 измеряют как среднее от замеров в различных направлениях по границе вырванного фрагмента бетона относительно центра анкерного устройства при условии разницы не более чем в два раза максимального замера к минимальному в соответствии с требованием п. 7.6.4 ГОСТ 22690-2015⁴.

При замере радиуса r_3 следует обратить внимание на то, что он не может быть меньше радиуса анкерного устройства $d/2$, рисунок 5.

Размеры r_2 , e , l находят из несложных геометрических соотношений.

Приняв взаимосвязь показателей прочности карбонизированного и основного неповрежденного карбонизацией бетона по (2) можно записать:

$$R_{\text{осн}} \cdot S_{\text{осн}} + R_{\text{к}} \cdot S_{\text{к}} = R_{\text{осн}} \cdot S_{\text{осн}} + \beta \cdot R_{\text{осн}} \cdot S_{\text{к}} = R_{\text{м}} \cdot (S_{\text{осн}} + S_{\text{к}}), \quad (4)$$

откуда показатель прочности основного неповрежденного карбонизацией бетона:

$$R_{\text{осн}} = \frac{R_{\text{м}} \cdot (S_{\text{осн}} + S_{\text{к}})}{S_{\text{осн}} + \beta \cdot S_{\text{к}}}, \quad (5)$$

где $R_{\text{м}}$ — прочность, вычисленная электронным блоком нагружающего устройства по градуировочным зависимостям и отображаемая на его дисплее как результат испытания.

В качестве иллюстрации приведем ряд характерных результатов испытаний бетона на отрыв со скалыванием несущих конструкций эксплуатируемых мостов в Приморском крае в 2024 году, при которых кроме обычных процедур замерялись радиусы r_1 и r_3 , таблица 3.

Таблица 3 / Table 3

Результаты контроля прочности бетона с учетом карбонизированного слоя

Results of concrete durability control with regard to carbonised layer

№ испытания Number of tests	r_1 , см, М	r_3 , М	e , М l , М	$S_{\text{к}}$, М ² $S_{\text{осн}}$, М ²	$h_{\text{к}}$, М	β	$R_{\text{м}}$, МПа	$R_{\text{осн}}$, МПа
1	0,095	0,013	0,032 0,058	0,018 0,015	0,015	0,769	29,85	34,15
2	0,085	0,018	0,029 0,048	0,013 0,011	0,005	0,916	26,30	27,55
3	0,098	0,014	0,013 0,078	0,0075 0,024	0,005	0,916	25,05	25,56
4	0,103	0,018	0,026 0,065	0,015 0,020	0,010	0,839	20,85	22,40
5	0,085	0,010	0,035 0,047	0,015 0,009	0,015	0,769	35,86	41,91
6	0,083	0,010	0,021 0,060	0,010 0,014	0,009	0,854	23,42	24,91
7	0,075	0,014	0,032 0,038	0,012 0,007	0,016	0,756	18,91	22,29

Разработано автором / Developed by the author

Приведенные в таблице 3 данные получены в результате испытаний методом отрыва со скалыванием двухопорным нагружающим устройством ПОС-60МГ4 с применением анкера 16×35 мм второго типа по ГОСТ 22690-2015⁴.

Электронный блок нагружающего устройства рассчитывает прочность $R_{\text{м}}$ как функцию усилия выдергивания фрагмента бетона, получая таким образом обобщенный показатель механических свойств карбонизированного и основного неповрежденного бетона; приведенные в последней колонке таблицы 3 величины вычленены из обобщенного показателя путем расчета по формуле (5) и представляют собой показатели прочности $R_{\text{осн}}$ основного неповрежденного карбонизацией бетона.

Заключение

Conclusion

1. Для испытания прочности бетона эксплуатируемых сооружений наиболее достоверным, с минимальным и некритичным воздействием на конструкцию, технологичным, с минимальными трудовыми затратами следует считать метод отрыва со скалыванием. При наличии карбонизированного слоя корректность результатов испытаний прочности бетона в общепринятом их исполнении неочевидна и требуется учет влияния карбонизированного слоя на результат испытаний.

2. Предложен способ учета влияния карбонизированного слоя на результат испытаний методом отрыва со скалыванием и формула определения прочности основного неповрежденного карбонизацией бетона.

3. В результате обзора и анализа исследований карбонизации бетона подтверждено, что именно фенолфталеиновый тест устанавливает границу полностью карбонизированного бетона, замер положения которой необходим для реализации предложенного метода определения прочности основного неповрежденного бетона.

4. На основании анализа ряда испытаний бетона в конструкциях мостов полагаем приемлемой формулу А.А. Потапкина (1) для оценки прочности карбонизированного бетона на стадии полевых работ в наиболее распространенном диапазоне развития карбонизации глубиной до 20 мм.

5. Корректирующий коэффициент β в формуле оценки прочности основного неповрежденного карбонизацией бетона основан на формуле А.А. Потапкина, однако может быть получен и в результате других исследований и иметь другую величину, что дает возможность считать предложенную формулу (5) достаточно универсальной.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Петухов, В.Д.** Особенности и виды механических, физических и комплексных неразрушающих методов определения прочности бетона и анализ их применения / В. Д. Петухов, С. В. Рябчиков // Информационно-технологический вестник. — 2022. — № 1. — С. 189–201. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48504477>. — EDN MDIHUO. (дата обращения: 13.10.2024).
2. Influence of the number of cores on concrete strength assessment by nondestructive tests in old existing structures / Y. Boussahoua, S. Kenai, Z.M. Sbartaï [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.1007/s42107-023-00599-0> // Asian Journal of Civil Engineering. — 2023. — Т 24. — № 6. — С. 1731–1745. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=60662868>. — EDN NEVUII. (дата обращения: 13.10.2024).
3. **Nilimaa, J.A.** Direct Tensile Strength Testing Method for Concrete from Existing Structures / J. Nilimaa, R. Nilforoush. — DOI <https://doi.org/10.3390/civileng4010019> // CivilEng. — 2023. — Т 4. — № 1. — С. 333–344. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=%2061191201>. — EDN HXXKZM. (дата обращения: 13.10.2024).

4. **Mishra, A.K.** Analysis of the Variation in Different Nondestructive Testing and Standards / A.K. Mishra. — DOI <https://doi.org/10.24321/2393.8307.202201> // Journal of Advanced Research in Civil and Environmental Engineering. — 2022. — Т 9. — № 1&2. — С. 1–11. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=56038918>. — EDN ZOXYLS. (дата обращения: 13.10.2024).
5. **Краснощеков, Ю.В.** Модель прочности бетона на отрыв со скалыванием / Ю.В. Краснощеков. — DOI <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-2-216-224> // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. — 2021. — Т 18. — № 2. — С. 216–224. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45939499>. — EDN YSPWTA. (дата обращения: 13.10.2024).
6. **Petersen, C.G.** LOK-TEST and CAPO-TEST pullout for in-situ concrete strength / C.G. Petersen. — DOI <https://doi.org/10.3233/brs-240220> // Bridge Structures. — 2024. — Т 20. — № 1-2. — С. 25–46. — URL: <https://content.iospress.com/articles/bridge-structures/brs240220>. — EDN QVIRJJ. (дата обращения: 13.10.2024).
7. **Молодин, В.В.** Влияние карбонизации бетонных поверхностей на их сцепление со свежееуложенным бетоном / В.В. Молодин, А.Е. Ануфриева, С.Н. Леонович. — DOI <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-320-328> // Наука и техника. — 2021. — Т 20. — № 4. — С. 320–328. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46330739>. — EDN ICXOQN. (дата обращения: 13.10.2024).
8. **Васильев, А.А.** Оценка карбонизации и развития ее параметров во времени по сечению бетонов для различных эксплуатационных условий / А.А. Васильев // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. — 2021. — № 8. — С. 43–52. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46423381>. — EDN KUXFDI. (дата обращения: 13.10.2024).
9. **Кабышева, Ю.К.** Расчетно-экспериментальная зависимость начальной карбонизации бетона от количества цемента и гарантированной прочности бетона на сжатие / Ю.К. Кабышева, К.Э. Агеева, А.А. Васильев // Инновационное развитие транспортного и строительного комплексов: Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию БелИИЖТа — БелГУТа, Гомель, 16–17 ноября 2023 года / Гомель: Учреждение образования "Белорусский государственный университет транспорта", 2023. — С. 15–17. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=59069840>. — EDN GDFMKW. (дата обращения: 13.10.2024).
10. **Гоглев, И.Н.** Новый индикаторный метод определения зон карбонизации в бетонных и железобетонных конструкциях / И.Н. Гоглев, С.А. Логинова. — DOI <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2022-7-8-8-16> // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. — 2022. — № 8. — С. 8–16. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49315744>. — EDN XCLXLP. (дата обращения: 13.10.2024).
11. **Васильев, А.А.** К вопросу о необходимости учета карбонизации бетона в нормативных документах Республики Беларусь по оценке технического состояния железобетонных элементов и конструкций / А.А. Васильев // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: наука и транспорт. — 2017. — № 1. — С. 87–88. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30123631>. — EDN ZJFBVX. (дата обращения: 13.10.2024).
12. Analysis of the influence of water qualities on the strength of concrete / K.M. Mbuh, N.L. Nsahlai, B. Ju. Penka, Ch.P. Fru. — DOI <https://doi.org/10.1186/s44147-024-00432-8> // Journal of Engineering and Applied Science. — 2024. — Т 71. — № 1. — С. 110. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=67450871>. — EDN APUANC. (дата обращения: 13.10.2024).
13. **Каримов, И.Ш.** Прочность сцепления цементного камня с заполнителями в бетоне и факторы, влияющие на нее / И.Ш. Каримов // Технологии бетонов. — 2013. — № 4. — С. 28–31. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22517233>. — EDN RBMFQU. (дата обращения: 13.10.2024).
14. **Осипов, С.Н.** Некоторые стохастические особенности карбонизации бетона и железобетона / С.Н. Осипов, А.В. Захаренко, В.М. Чик. — DOI <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-2-127-136> // Наука и техника. — 2019. — Т 18. — № 2. — С. 127–136. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38511757>. — EDN KOUQRS. (дата обращения: 13.10.2024).
15. Влияние карбонизации защитного слоя бетона на прочность при неразрушающем контроле / И.А. Терехов, Н.Н. Трекин, Э.Н. Кодыш, А.В. Быбка. — DOI <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2023.06.31-37> // Промышленное и гражданское строительство. — 2023. — № 6. — С. 31–37. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54202000>. — EDN JBHFSR. (дата обращения: 13.10.2024).

16. Влияние процесса карбонизации на состав продуктов гидратации и прочность цементного камня / В.К. Козлова, А.В. Вольф, Е.В. Божок [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2018.02.022> // Ползуновский вестник. — 2018. — № 2. — С. 117–121. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35653041>. — EDN VADONQ. (дата обращения: 13.10.2024).
17. **Потапкин, А.А.** Оценка ресурса мостов с учетом дефектов и повреждений / А.А. Потапкин // Вестник мостостроения. — 1997. — 3. — С. 22–23.

Сведения об авторах:

Томилов Сергей Николаевич — кандидат технических наук, доцент, доцент Высшей школы транспортного строительства, геодезии и землеустройства, ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск, Россия, e-mail: serg_tomilov@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3008-1249>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=990391

Статья получена: 16.10.2024. Принята к публикации: 15.12.2024. Опубликовано онлайн: 29.12.2024.

REFERENCES

1. Petukhov V.D., Rabchicov S.V. Various of Methods That Could Be Used in Non-Destructive Purpose for Expecting and Analysis of The Strength of Concrete and Its Subsequent Application. Information technology Bulletin. 2022;(2): 35–39. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48504477> (accessed 13th October 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
2. Boussahoua Y., Kenai S., Sbartaï Z.M., Breyssse D., Ali-Benyahia Kh. Influence of the number of cores on concrete strength assessment by nondestructive tests in old existing structures. *Asian Journal of Civil Engineering*. 2023;24(6): 1731–1745. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s42107-023-00599-0>.
3. Nilimaa J., Nilforoush R. Direct Tensile Strength Testing Method for Concrete from Existing Structures. *CivilEng*. 2023;4(1): 333–344. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/civileng4010019>.
4. Mishra A.K. Analysis of the Variation in Different Nondestructive Testing and Standards. *Journal of Advanced Research in Civil and Environmental Engineering*. 2022;9(1&2): 1–11. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.24321/2393.8307.202201>.
5. Krasnoshchekov Yu.V. Model of Shear Test for Tearing Strength of Concrete. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021;18(2): 216–224. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-2-216-224>.
6. Petersen C.G. LOK-TEST and CAPO-TEST pullout for in-situ concrete strength. *Bridge Structures*. 2024;20(1-2): 25–46. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3233/brs-240220>.
7. Molodin V.V., Anufrieva A.E., Leonovich S.N. Influence of Carbonization of Concrete Surfaces on Their Adhesion with Freshly-Laid Concrete. *Science and Technique*. 2021;20(4): 320–328. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-4-320-328>.
8. Vasiliev A. Assessment of Carbonization and Development of Its Parameters During Time Crossed Concrete for Different Operating Conditions. *Herald of Polotsk State University. Series F. Civil Engineering. Applied Sciences*. 2021;(8): 43–52. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46423381> (accessed 13th October 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
9. Kabysheva Yu.K., Ageyeva K.E., Vasil'yev A.A. [Calculated and experimental dependence of the initial carbonation of concrete on the amount of cement and the guaranteed compressive strength of concrete]. In: [Innovative development of transport and construction complexes: Proceedings of the International scientific and practical conference dedicated to the 70th anniversary of BelIIZhT — BelSUT, Gomel, November 16–17, 2023]. Gomel: Belarusian State University of Transport; 2023. p. 15–17. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=59069840> (accessed 13th October 2024). (In Russ.).
10. Goglev I., Loginova S. New Indicator Method for Determining Carbonization Zones in Concrete and Reinforced Concrete Structures. *Bulletin of BSTU Named after V.G. Shukhov*. 2022;(8): 8–16. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2022-7-8-8-16>.

11. Vasilyev A.A. On the Issue of The Need to Take into Account the Carbonation of Concrete in The Regulatory Documents of The Republic of Belarus on The Assessment of The Technical Condition of Reinforced Concrete Elements and Structures. *Bulletin of BSUT: science and transport*. 2017;(1): 87–88. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30123631> (accessed 13th October 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
12. Mbuh K.M., Nsahlai N.L., Penka B.Ju., Fru Ch.P. Analysis of the influence of water qualities on the strength of concrete. *Journal of Engineering and Applied Science*. 2024;71(1): 110. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1186/s44147-024-00432-8>.
13. Karimov I.Sh. The Strength of Adhesion of The Cement Stone to The Placeholders in Concrete and Factors Affecting on It. *Concrete Technologies*. 2013;(4): 28–31. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22517233> (accessed 13th October 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
14. Osipov S.N., Zakharenko A.V., Chik V.M. Some Stochastic Specific Features of Concrete and Reinforced Concrete Carbonization. *Science and Technique*. 2019;18(2): 127–136. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-2-127-136>.
15. Terekhov I.A., Trekin N.N., Kodysh E.N., Bybka A.V. Influence of Carbonization of The Protective Layer of Concrete on Strength During Non-Destructive Testing. *Industrial and Civil Engineering*. 2023;(6): 31–37. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2023.06.31-37>.
16. Kozlova V.K., Vol'f A.V., Bozhok E.V. et al. [The influence of the carbonation process on the composition of hydration products and the strength of cement stone]. *Polzunovskiy Vestnik*. 2018;(2): 117–121. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2018.02.022>.
17. Potapkin A.A. Otsenka resursa mostov s uchetom defektov i povrezhdeniy [Evaluation of bridge life taking into account defects and damages]. *Vestnik mostostroyeniya = Bridge Construction Bulletin*. 1997;(3): 22–23. (In Russ.).

Information about the authors:

Sergey N. Tomilov — Pacific National University, Khabarovsk, Russia, e-mail: serg_tomilov@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3008-1249>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=990391

Submitted: 16th October 2024. Revised: 15th December 2024. Published online: 29th December 2024.