



Получена: 14.05.2021 г.

Приета: 16.08.2021 г.

ИЗМЕНЕНИЕ НА СКОРОСТТА И ДЪЛБОЧИНАТА НА КАРБОНИЗАЦИЯ ВЪВ ФУНКЦИЯ НА ФАКТОРИТЕ НА СЪСТАВА И СТРУКТУРНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА БЕТОНА

Б. Петров¹, Г. Алиманова²

Ключови думи: бетон, карбонизация, дълготрайност, вид на цимента, състав на бетона

РЕЗЮМЕ

Карбонизацията на бетона е процес на взаимодействие на $\text{Ca}(\text{OH})_2$ от циментовия камък с CO_2 от въздуха, в резултат на което водородният показател (pH) на поровата течност намалява и тя се неутрализира. При бетона карбонизацията е свързана с повишаване на плътността, докато в стоманобетонните конструкции понижаването на алкалността на циментовия камък води до корозия на стоманената армировка. Разрушаването на пасивирания слой около армировъчните пръти се осъществява при понижаване на водородния показател pH под 11,5.

В статията са представени резултати от проведени лабораторни изследвания при ускорена карбонизация на бетони. Представено е влиянието на факторите на състава и структурата на бетона върху скоростта и интензивността на карбонизационните процеси. Пробните тела са изготвени с различни видове цименти, различни водоциментни отношения и съотношение между обема на циментовата паста и обема на добавъчните материали. В изследването допълнително е установено влиянието на различни видове импрегнационни покрития върху скоростта на развитие на карбонизационните процеси.

¹ Богомил Петров, проф. д-р инж., кат. „Строителни материали и изолации“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: b_petrov@abv.bg

² Гюлнас Алиманова, инж., УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: gulnazo@gmail.com

1. Въведение

Бетонът е основен материал, който се прилага във всички области на строителството [1]. При правилно проектиране, конструиране, производство, изпълнение и експлоатация бетонът е в състояние да осигури необходимата носимоспособност и дълготрайност на конструкцията [2].

Основните причини за повреди и компрометиране на дълготрайността при стоманобетонните конструкции са свързани с корозията на армировъчните пръти. Корозията на стоманата е свързана основно с редуциране на водородния показател на циментовия камък при повишени количества на въглероден диоксид във въздуха или с проникването на хлорни йони. Тези процеси водят до депасивиране на армировката.

1.1. Механизъм на карбонизация

Карбонизацията на бетона е сложен физико-химичен процес, протичащ основно в циментовия камък на бетона, поради факта, че добавъчните материали са инертни и трудно влизат във взаимодействие с киселите газове [3]. С CO_2 от въздуха взаимодействат основните продукти на хидратацията, като $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и калциеви хидросиликати (CSH), както и нехидратиралите компоненти, съдържащи алит (C_3S) и белит (C_2S). Водата присъства във вид на порова течност и има важна роля за обезпечаване на йонния транспорт в структурата на циментовия камък. Водата осигурява необходимата електролитна среда за осъществяване на реакцията между CO_2 и $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

При ниска относителна влажност на въздуха ($< 50\%$) имаме ускорена дифузия на CO_2 , но липсата на вода в порите на бетона забавят развитието на карбонизационните процеси. Съответно, при висока относителна влажност на въздуха ($> 80\%$), порите на бетона са запълнени с вода, което пък от своя страна възпрепятства дифузията на въглероден диоксид. Това обяснява факта, че скоростта на карбонизация е най-висока при относителна влажност на въздуха 55 – 75%.

1.1.1. Механизъм на карбонизация на течната фаза в порите на бетона

При разглеждане на карбонизацията на течната фаза на бетона се има предвид взаимодействието между въглеродния диоксид и калциевия карбонат. Калциевият карбонат присъства в три кристални форми: арагони, ватерит и калцит. Калцитът и ватеритът са най-често срещани в карбонизирания бетон. Метастабилният ватерит се преобразува в стабилен калцит с времето [4, 5].

1.1.2. Механизъм на карбонизация на твърдата фаза на циментовото тесто

Освен $\text{Ca}(\text{OH})_2$, циментовото тесто съдържа калциев хидросиликат (CSH) и еtringит/моносулфат (Aft/AFm). Тези компоненти са стабилни при високи стойности на pH и високо съдържание на Ca^{2+} в поровата течност.

След карбонизирането на $\text{Ca}(\text{OH})_2$, pH и количеството на Ca^{2+} намаляват и започва разтварянето на CSH. Карбонизацията води до намаляване на количество на Ca^{2+} в поровата течност, което пък се компенсира чрез отделяне на Ca^{2+} от CSH [6]. Това променя състава на CSH и води до понижаване на съотношението CaO/SiO_2 . При стойности на това отношение под 1 и при pH под 10 съединението се трансформира в силикагел [7].

Еtringитът и моносулфатът също са стабилни само при високо pH и висока концентрация на Ca^{2+} [8]. При pH под 11,6, AFm (моносулфат) се преобразува в еtringит и алуминатни съединения. При стойности на pH 10,5, Aft (етрингит) се разлага във вид на

сулфатни йони и алуминиев хидроксид. Освободените сулфатни йони се утаяват като гипс или дифузират, образувайки нов еtringит. Като краен резултат повечето Ca^{2+} от алуминатните фази образуват карбонат, а алуминатните и феритовите фази образуват стабилни метални хидроксида [9 ÷ 11].

1.2. Фактори, оказващи влияние на скоростта на карбонизация

Карбонизацията на бетона представлява физико-химическа реакция между компонентите на циментовия камък от бетона и въглеродния диоксид (CO_2) от въздуха, в резултат на което се получава калциев карбонат. Скоростта на карбонизация е от съществено значение за продължителността на жизнения цикъл на бетона [12]. Факторите, оказващи влияние върху скоростта на този процес се подразделят на три основни групи [13]:

- фактори от състава и структурата на бетона – вид и количество на цимента, водоциментно отношение, структура на бетона, наличие на пукнатини, обем на добавъчните материали, химически добавки и др.;
- фактори на околната среда – влажност на въздуха, концентрация на CO_2 , температура, количество на валежите;
- технологични фактори – уплътняване на бетоновата смес и грижи в ранната възраст.

1.2.1. Вид и количество на цимента

Дълбочината на карбонизация е обратнопропорционална на количеството на цимента в бетоновата смес. Скоростта на карбонизация нараства с намаляване на количеството на цимента.

Според [14] при една и съща скорост на дифузия на CO_2 дълбочината на карбонизация зависи от обема на алкалните компоненти в бетона, което се явява функция на вида на цимента [15]. Количеството CO_2 , необходимо за взаимодействието с алкалните съединения, варира в зависимост от вида на цимента. Тъй като основното вещество, което взаимодейства с въглеродния диоксид, е $\text{Ca}(\text{OH})_2$, се предполага, че при бетоните с повишено съдържание на портландциментов клинкер процесът на карбонизация се проявява в по-малък обем, но с по-висока скорост [16].

Смесените цименти се получават чрез смилане на портландциментов клинкер и различни видове минерални добавки. Пуцолановите добавки увеличават количеството на калциевите хидросиликати, което води до образуване на по-голямо количество фини и значително по-слабо взаимно свързани пори [2].

В [17, 18] е установено, че скоростта на карбонизация, при равни други условия, се увеличава при смесените цименти, но самият процес се проявява в по-малък мащаб.

1.2.2. Порьозност

Порьозността на бетона се контролира чрез водоциментното отношение (В/Ц) [17]. С увеличаване на В/Ц дълбочината на карбонизация се увеличава по приблизително линеен закон [19]. Количеството на водата трябва да бъде достатъчно за осъществяване на хидратацията и образуване на еднородна лесно обработваема смес. Изпаряването на излишната несвързана вода формира пори, които увеличават пропускливостта на газове, респективно улесняват дифузията на CO_2 . Порьозността нараства с увеличаване на В/Ц отношение.

1.2.3. Структура на бетона и наличие на пукнатини

Карбонизацията е процес, който започва на повърхността и продължава в дълбочина, затова повърхността, изложена на прякото действие на околната среда, е от значение. Разпространението на карбонизацията в дълбочина се осъществява чрез порите, но трябва да се отчете и наличието на микропукнатини в бетона [20].

2. Методика на изследването

2.1. Пробни тела

За да се отчете влиянието на факторите на състава, при изследване на механизма на карбонизация са изготвени пробни тела със следните характеристики:

А/ Вид на цимента

Изготвени са три серии състави:

Серия 1 – портландцимент СЕМ I 42,5, означен като „СЕМ I“;

Серия 2 – смес от СЕМ I 42,5 и 10% летяща пепел, означен като „СЕМ I + 10% Р“;

Серия 3 – смес от СЕМ I 42,5 и 5% МСП, означен като „СЕМ I + 5% М“.

Б/ Водоциментово отношение (w/c) – изследвани са състави с водоциментови отношения $w/c = 0,4$; $w/c = 0,55$ и $w/c = 0,7$.

В/ Съотношение между обема на циментовата паста и обема на добавъчните материали ($V_{цк}/V_{дм}$): изследвани са състави със съотношения 1/1,7; 1/2,0; 1/2,3.



Фиг. 1. Пробни тела

2.2. Материали за изготвяне на бетонната смес

2.2.1. Цимент

При изследванията е използван цимент СЕМ I 42,5, производство на фирма DEKEN. Циментът отговаря на изискванията на БДС EN 197-1:2011 [21]. Характеристиките на цимента са посочени в табл. 1.

Таблица 1. Физични и механични свойства на цимента

№	Физико-механична характеристика	Стойност	Мерна единица
1	Обемна плътност	967	kg/m ³
2	Специфична плътност	2731	kg/m ³
3	Нормена консистенция	33	%
4	Начало на свързване	160 (6,2 mm)	min
5	Край на свързване	285 (0,5 mm)	min
6	Якост на огъване (2-и ден)	5,3	MPa
7	Якост на натиск (2-и ден)	23,4	MPa
8	Якост на огъване (28-и ден)	8,9	MPa
9	Якост на натиск (28-и ден)	51,1	MPa

2.2.2. Едър добавъчен материал

Използваният едър добавъчен материал (ЕДМ) е трошен камък, получен чрез натрошаване на естествени скални породи фракция 4/11,2 mm от кариера „Студена“. Трошеният камък съответства на изискванията на БДС EN 12620:2002+A1:2008 [22]. Характеристиките на едрия добавъчен материал са посочени в табл. 2.

Таблица 2. Физични и механични свойства на ЕДМ

№	Физико-механична характеристика	Стойност	Мерна единица
1	Обемна плътност	1488	kg/m ³
2	Специфична плътност	2690	kg/m ³
3	Дробимост на ЕДМ	6,9	%

2.2.3. Дребен добавъчен материал (пясък)

За провеждане на изследването е използван дребен добавъчен материал от кариера „Челопечене“ с размери на зърната, не по-големи от 4 mm, съответстващ на изискванията на БДС EN 12620:2002+A1:2008. Характеристиките на пясъка са посочени в табл. 3.

Таблица 3. Физични и механични свойства на пясъка

№	Физико-механична характеристика	Стойност	Мерна единица
1	Обемна плътност	1405	kg/m ³
2	Специфична плътност	2580	kg/m ³
3	Модул на едрината	2,9	-

2.3. Проектиране на състава на бетона

Използваният метод за проектирането на състава на бетона е методът на плътните обеми. Съставите на бетонната смес за 1 m³ бетонна смес са посочени в табл. 4.

Таблица 4. Състави на бетона

w/c	0,4	0,55	0,7	0,4	0,55	0,7	0,4	0,55	0,7
$V_{цг}/V_{едм}$	1 / 1,7			1 / 2,0			1 / 2,3		
Цимент, kg	476	398	342	429	358	308	390	326	280
Вода, l	190	219	240	190	197	219	171	179	196
ЕДМ, kg	951	951	951	1007	1007	1007	1052	1052	1052
Пясък, kg	688	688	688	729	729	729	762	762	762

2.4. Приготвяне и отлежаване на пробните тела

Бетонната смес се забърква в гравитачен бетоносмесител с максимален обем 120 m³. Консистенцията на бетонната смес, измерена чрез мярката на слягане с конус на Абрамс, съответства на клас S3 със слягане 100 – 150 mm. Бетонът се уплътнява с помощта на вибрационна маса с честота 50 Hz, за време 5 – 10 s.

Пробните тела се декофрират на 24-ия час, след което отлежават до 28-ия ден, непосредствено до началото на изпитването, във вода с температура (20±2) °C или в камера при температура (20±2) °C и относителна влажност $\phi = 95\%$.

2.4.1. Брой на пробните тела

За всеки вид цимент се изготвят пробни тела с 9 различни състава (3 различни w/c × 3 $V_{цг}/V_{едм}$), за трите разновидности цимент се получават общо 27 състава. Като за всеки един състав се изготвят по 27 пробни тела, които се подлагат на следните изпитвания:

○ Пробни тела 100/100/100

6 бр. (съответно се изпитват 3 бр. на 28-ия ден и 3 бр. на 90-ия ден). Изпитват се на:

- якост на натиск съгл. БДС EN 12390-3:2019 [23];
- плътност на втвърден бетон съгл. БДС EN 12390-7:2019 [24];
- определяне на якостта на бетона чрез скоростта на преминаване на ултразвуков импулс БДС EN 12504-4:2005 [25];
- рентгенова дифракция (XRD) и термогравиметричен анализ.

○ Пробни тела 70,7/70,7/70,7

15 бр., които се излагат на въздействието на въглероден диоксид в специално пригодена камера съгласно БДС EN 12390-12:2020 [26]:

- 1 бр. пробни тела – якост на натиск след карбонизационните процеси;
- 2 бр. пробни тела – якост на опън при разцепване, отчитане на новообразуванията и определяне на дълбочината на карбонизация;
- 6 бр. за определяне на дълбочината на карбонизация и отчитане на новообразуванията с различни покрития, 3 бр. с покритие тип 1 (силиконов импрегнатор) и 3 бр. с покритие тип 2 (полиуретанов грунд);

- 6 бр. пробни тела с вложена армировка за оценяване на корозията на армировка-та и осигуряване на бетонно покритие 30 mm, от които 3 бр. без покритие и 3 бр. с покритие тип 1 (силиконов импрегнатор).

- **Пробни тела 50/50/50**

6 бр. с предварително вложени армировъчни пръти за оценяване на корозията на армировка-та и осигуряване на бетонно покритие 20 mm – целта е да се оцени влиянието и на дебелината на бетонното покритие, от които 3 бр. са без покритие, 3 бр. – покритие тип 1 (силиконов импрегнатор).

2.5. План на експеримента

Влиянието на основните фактори на състава върху изменението на дълбочината на карбонизация на бетоните е изследвано с помощта на планиран експеримент. Избраният модел е двуфакторен план на тип Бокс-Бенкин, който е близък до D-оптималните планове и осигурява висока точност на оценката на регресионните коефициенти.

Изведен е математически модел – полином от втора степен, описващ влиянието на всеки един фактор (X_1 – водоциментно отношение, X_2 – отношение циментово тесто/добавъчни материали по обем) върху дълбочината на карбонизация (Y).

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 + b_{12} X_1 X_2 . \quad (1)$$

Факторите в натурален и кодиран вид са представени в табл. 5. Планът на експеримента с факторите в натурален и кодиран вид е даден в табл. 6.

Таблица 5. Рецептурни фактори на експерименталната постановка

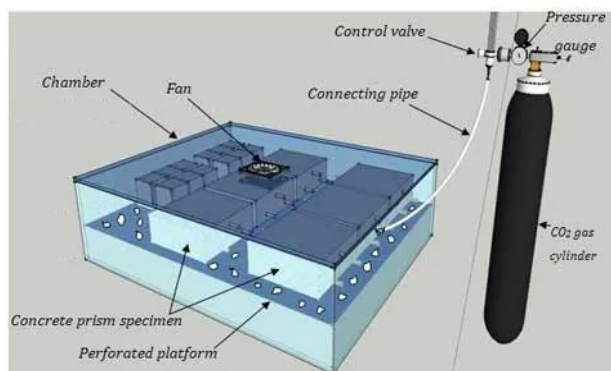
Фактори		Нива на вариране					
		Натурален вид			Кодиран вид		
Натурален	Кодиран	X_i, \max	$X_i, 0$	X_i, \min	X_i, \max	$X_i, 0$	X_i, \min
В/Ц	X_1	0,7	0,55	0,4	1	0	-1
$V_{цк}/V_{дм}$	X_2	1/1,7	1/2	1/2,3	1	-0,14	-1

Таблица 6. План на експеримента

Опит	Водоциментно отношение (X_1)		$V_{цк}/V_{дм}$ (X_2)		
	Натурален вид	Кодиран вид	Натурален вид	Кодиран вид	
1	0,70	1	1/1,7	0,588	1
2	0,70	1	1/2,0	0,511	-0,14
3	0,70	1	1/2,3	0,435	-1
4	0,55	0	1/1,7	0,588	1
5	0,55	0	1/2,0	0,511	-0,14
6	0,55	0	1/2,3	0,435	-1
7	0,40	-1	1/1,7	0,588	1
8	0,40	-1	1/2,0	0,511	-0,14
9	0,40	-1	1/2,3	0,435	-1

2.6. Дълготрайност – карбонизация

Карбонизацията на бетона при нормална концентрация на CO_2 във въздуха 0,3 – 1% се реализира изключително бавно. Поради това изпитването за установяване на съпротивлението на бетона срещу карбонизация се превръща в твърде продължителен процес. Проблемите са решени чрез методите за ускорено изпитване на карбонизация. Европейският стандарт, който регламентира условията за провеждане на ускорено изпитване на карбонизация, е БДС EN 12390-12:2020 [26]. Изпитването се провежда при концентрация на въглеродния диоксид по обем $3\pm 0,5\%$, температура 20 ± 2 °C и относителна влажност на въздуха $57\pm 3\%$, с продължителност 70 денонощия.



Фиг. 2. Схема на изпитване на ускорена карбонизация [27]



Фиг. 3. Експериментална постановка за ускорена карбонизация

2.6.1. Експериментална постановка

Изпитването на карбонизация се реализира в херметични съдове с обем 300 l и 100 l. Автоматизирано се контролира съдържанието на CO_2 по обем, температурата на въздуха и относителната влажност. Количеството CO_2 се дозира чрез редуцир-вентил до получаване на желаната концентрация. Температурата и влажността се следят чрез електронен термохигрометър. Съдържанието на въглеродния диоксид се подновява всяка седмица, за да се гарантира постоянна концентрация на CO_2 . В камерите се осъществява постоянна циркулация на въздуха чрез вентилатор (фиг. 4). Пробните тела са подредени в 3 реда, като са отделени с перфорирана решетка. Отстояние между пробите е 10 mm, за да се гарантира свободната циркулация на въглеродния диоксид.

2.6.2. Дълбочина на карбонизация

Определянето на дълбочината на карбонизация се осъществява съгласно БДС EN 14630:2007 [28].

Пробното тяло се разцепва на две части, непосредствено преди провеждане на изпитването. Вътрешните повърхности се почистват от прах и се напръскват със стандартен разтвор на фенолфталеин и спирт. Дълбочината на карбонизация се определя като средно аритметична стойност от 12 измервания върху вътрешността на пробното тяло, по 3 измервания на всеки ръб на пробното тяло.



Фиг. 4. Карбонизирали пробни тела

3. Експериментални резултати

Резултати от проведените изпитвания за определяне на дълбочината на карбонизация са представени в табличен и графичен вид, като са разгледани поотделно получените лабораторни резултати за всяка серия. Извършен е сравнителен анализ между резултатите за базовия цимент и циментите с минерални добавки.

3.1. Дълбочина на карбонизация на пробни тела с цимент СЕМ I

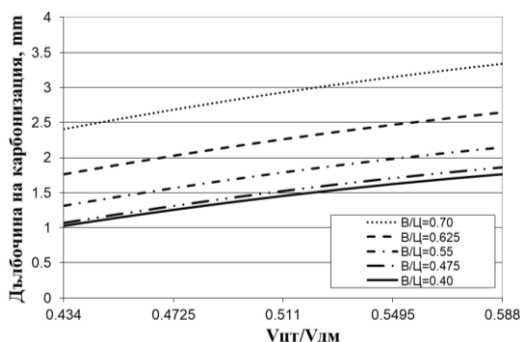
Резултати, получени от проведените изпитвания за определяне на дълбочината на карбонизация на бетони с цимент СЕМ I, са представени в mm в табл. 7.

Таблица 7. Опитни резултати за дълбочината на карбонизация – Серия 1

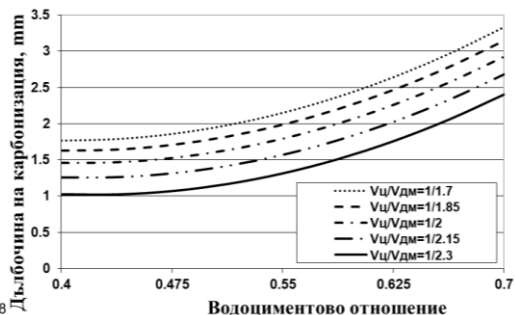
Означение на състава	Опит	Опитни резултати		Опитни резултати – средна стойност	Теоретична стойност	Отклонение %
		Пробно тяло 1	Пробно тяло 2			
СЕМ I 0,7/1,7	1	3,00	3,60	3,30	3,33	1,03
СЕМ I 0,7/2,0	2	2,40	3,40	2,90	2,86	1,31
СЕМ I 0,7/2,3	3	2,70	2,10	2,40	2,40	0,15
СЕМ I 0,55/1,7	4	2,00	2,40	2,20	2,15	2,27
СЕМ I 0,55/2,0	5	1,80	1,60	1,70	1,73	1,96
СЕМ I 0,55/2,3	6	1,60	1,00	1,30	1,32	1,28
СЕМ I 0,4/1,7	7	1,80	1,70	1,75	1,77	0,90
СЕМ I 0,4/2,0	8	1,20	1,60	1,40	1,40	0,32
СЕМ I 0,4/2,3	9	1,00	1,10	1,05	1,03	1,94
Максимално отклонение:						2,27
Средно отклонение:						1,24

С помощта на математическия модел е изследвано влиянието на всеки фактор върху дълбочината на карбонизация. Вж. фиг. 6 и фиг. 7, както и едновременното действие на комбинация от два фактора. Вж. фиг. 8.

Установено е, че с намаляване на водоциментното отношение се редуцира дълбочината на карбонизация. Основната причина за това е повишената плътност на бетона и намалената дифузия на CO_2 . С увеличаването на водоциментното отношение разпространението на карбонизацията в дълбочина се увеличава по зависимост, близка до линейната. Изпаряването на излишната вода води до образуване на капилярни пори, които увеличават пропускливостта на газове, а с оглед на карбонизацията улесняват дифузията на CO_2 през порите. Поради това с нарастване на порьозността, тоест с увеличаването на стойността на В/Ц, наблюдаваме прогресиране на карбонизационния фронт в по-голяма дълбочина.

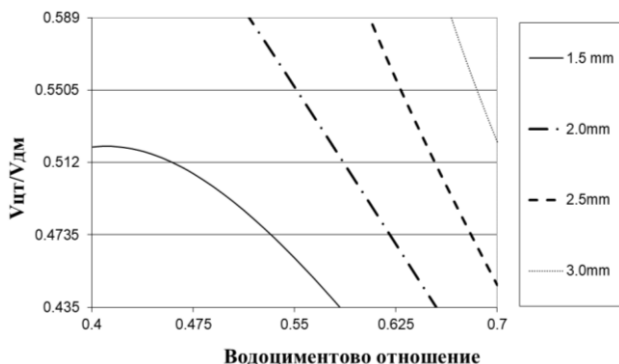


Фиг. 5. Влияние на съотношението между обема на компонентите върху дълбочината на карбонизация на състави с цимент СЕМ I



Фиг. 6. Влияние на водоциментното отношение върху дълбочината на карбонизация на състави с цимент СЕМ I 42,5

Установено е влиянието на отношението между обема на основните компоненти върху дълбочината на карбонизация. При трите стойности на водоциментното отношение (0,4; 0,55; 0,7) наблюдаваме идентична тенденция. Дълбочината на карбонизация е най-голяма при $V_{\text{цт}}/V_{\text{дм}} = 1/1,7$, когато относителният дял на циментовия камък е най-голям. При $V_{\text{цт}}/V_{\text{дм}} = 1/2,3$ относителният обем на циментовото тесто е най-малък, което затруднява интензивното напредване на карбонизационния фронт. При $V_{\text{цт}}/V_{\text{дм}} = 1/1,7$ обемният дял на циментовото тесто е най-голям, атмосферният диоксид влиза във взаимодействия на повърхността с огромен обем калциев хидроксид от циментовия камък, което води до бързото разпространение на карбонизационните процеси в дълбочина.



Фиг. 7. Изолинии за влияние на факторите върху дълбочината на карбонизация на състави от Серия 1 с цимент СЕМ I 42,5

При комбинираното действие на двата фактора, водещ за развитието на карбонизация в дълбочина се явява водоциментното отношение, а като второстепенен е отношението на циментовото тесто към добавъчните материали по обем. Съчетаването на високо водоциментно отношение (0,7) и голям обем на циментовото тесто при $V_{цт}/V_{дм} = 2,3$ води до образуването на най-благоприятната среда за напредването на карбонизацията в дълбочина.

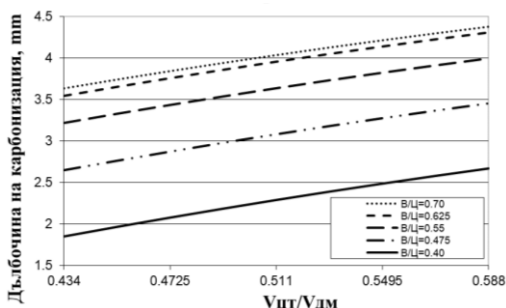
3.2. Дълбочина на карбонизация Серия 2 със смесен цимент СЕМ I +10% летяща пепел

Резултати, получени от проведените изпитвания за определяне на дълбочината на карбонизация на бетони от Серия 2 са представени в табл. 8. Опитните резултати и теоретичните стойности са зададени в mm.

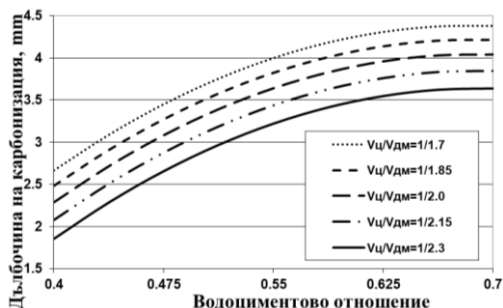
Таблица 8. Опитни резултати за дълбочината на карбонизация на състави от Серия 2 с цимент СЕМ I+10% летяща пепел

Означение на състава	Опит	Опитни резултати		Опитни резултати – средна стойност	Теоретична стойност	Отклонение %
		Пробно тяло 1	Пробно тяло 2			
СЕМ I +10%пепел 0,7/1,7	1	4,40	4,30	4,35	4,38	0,71
СЕМ I +10%пепел 0,7/2,0	2	3,80	3,90	3,85	3,99	3,50
СЕМ I +10%пепел 0,7/2,3	3	4,20	3,50	3,80	3,63	4,37
СЕМ I +10%пепел 0,55/1,7	4	4,10	4,20	4,15	4,00	3,61
СЕМ I +10%пепел 0,55/2,0	5	3,50	3,80	3,65	3,58	1,82
СЕМ I +10%пепел 0,55/2,3	6	2,60	3,40	3,00	3,22	7,22
СЕМ I +10%пепел 0,4/1,7	7	2,10	3,00	2,55	2,66	4,65
СЕМ I +10%пепел 0,4/2,0	8	2,20	2,40	2,30	2,23	2,97
СЕМ I +10%пепел 0,4/2,3	9	1,80	2,00	1,90	1,85	2,65
Максимално отклонение:						7,22
Средно отклонение:						3,50

С помощта на математическия модел е изследвано влиянието на факторите върху дълбочината на карбонизация. Вж. фиг. 9 и фиг. 10, както и едновременното действие на комбинация от два фактора. Вж. фиг. 11.



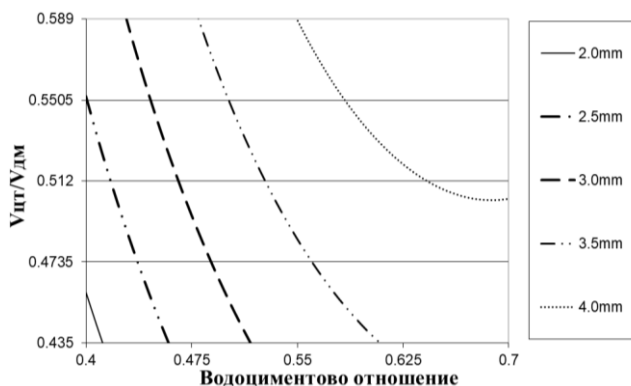
Фиг. 8. Влияние на отношението между обема на компонентите върху дълбочината на карбонизация на състави Серия 2



Фиг. 9. Влияние на водоциментното отношение върху дълбочината на карбонизация на състави Серия 2

Както при бетоните с цимент СЕМ I 42,5 водоциментното отношение е основният фактор, който влияе на дълбочината на карбонизация. Основната причина за това е, че водоциментното отношение контролира порьозността на бетона. С увеличаването му разпространението на карбонизацията в дълбочина се увеличава по приблизително линейен закон. И затова, очаквано, с нарастване на порьозността, тоест увеличаването на стойността на В/Ц отношение, наблюдаваме прогресиране на карбонизационния фронт в по-голяма дълбочина. При бетони с отношение $V_{\text{цт}}/V_{\text{дм}} = 1/2,3$ дълбочината на карбонизация при В/Ц = 0,4 е едва 1,8 mm, но с увеличаването на това отношение до 0,7 вече фронтът на карбонизация значително прогресира в дълбочина, достигайки 3,6 mm.

Влиянието на втория разглеждан фактор върху дълбочината на карбонизация е отношението по обем на циментовото тесто по обем. И при трите В/Ц отношения (0,4; 0,55; 0,7) наблюдаваме спазването на една и съща тенденция. Дълбочината на карбонизация се явява най-голяма при $V_{\text{цт}}/V_{\text{дм}} = 1/1,7$. Това се дължи на факта, че при $V_{\text{цт}}/V_{\text{дм}} = 1/2,3$ циментовото тесто е най-малко, а процесът протича основно в циментовия камък на бетона, добавъчните материали са инертни и те трудно влизат във взаимодействие с киселите газове и при тази стойност на отношението $V_{\text{цт}}/V_{\text{дм}}$ техният дял по обем е най-голям и затрудняват напредването на карбонизационния фронт. При $V_{\text{цт}}/V_{\text{дм}} = 1/1,7$ обемният дял на циментовото тесто е най-голям, атмосферният диоксид влиза във взаимодействие на повърхността с огромен обем калциев хидроксид от циментовия камък, което води до бързото разпространение на карбонизационните процеси в дълбочина.



Фиг. 10. Влияние на факторите върху дълбочината на карбонизация на състави Серия 2

Изолиниите показват, че водещо за развитието на карбонизация в дълбочина се явява водоциментното отношение, а като второстепенно е отношението на циментовото тесто към добавъчните материали по обем. Съчетаването на високо водоциментно отношение (0,7) и голям обем на циментовото тесто при $V_{\text{цт}}/V_{\text{дм}} = 1/1,7$ води до образуването на най-благоприятната среда за разпространение на процесите на карбонизация в дълбочина.

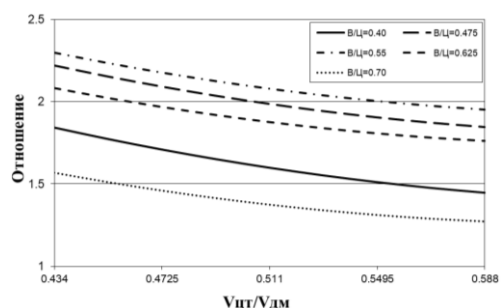
3.3. Изследване на изменението на дълбочината на карбонизация във функция на вида на цимента

Резултати, получени от проведените изпитвания за изследване на отношението между дълбочината на карбонизация на бетони при двата вида цимент от Серия 1 и Серия 2, са представени в табл. 9. Опитните резултати и теоретичните стойности са зададени в mm.

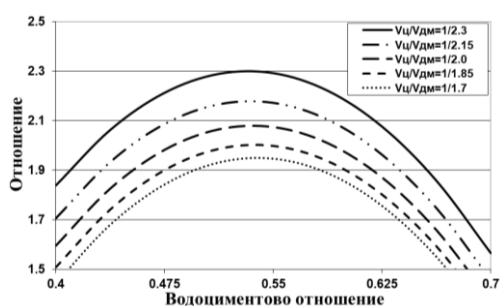
Таблица 9. Опитни резултати за отношението между дълбочината на карбонизация на състави от Серия 1 и Серия 2

Опит	Състав	Опитни резултати		Отношение СЕМ I+10%пепел към СЕМ I	Теоретична стойност	Отклонение %
		СЕМ I	СЕМ I + 10% пепел			
1	0,7/1,7	3,30	4,35	1,318	1,269	3,68
2	0,7/2,0	2,90	3,85	1,328	1,393	4,92
3	0,7/2,3	2,40	3,80	1,583	1,566	1,05
4	0,55/1,7	2,20	4,15	1,886	1,947	3,25
5	0,55/2,0	1,70	3,65	2,147	2,099	2,20
6	0,55/2,3	1,30	3,00	2,308	2,294	0,60
7	0,4/1,7	1,75	2,55	1,457	1,444	0,87
8	0,4/2,0	1,40	2,30	1,643	1,624	1,09
9	0,4/2,3	1,05	1,90	1,810	1,840	1,69
Максимално отклонение:						4,92
Средно отклонение:						2,16

С помощта на математическия модел е изследвано влиянието на факторите върху изменението на дълбочината на карбонизация при различни видове цимент. Вж. фиг. 12 и фиг. 13, както и едновременното действие на комбинация от два фактора. Вж. фиг. 14.



Фиг. 11. Влияние на отношението между обема на компонентите върху отношението между дълбочината на карбонизация състави от Серия 1 и Серия 2



Фиг. 12. Влияние на водоциментното отношение върху отношението между дълбочината на карбонизация състави от Серия 1 и Серия 2

От получените резултати ясно се вижда, че дълбочината на карбонизация се увеличава с добавянето на леляща пепел. Много автори са стигнали до извода, че това се дължи на факта, че при пуцолановата реакция $\text{Ca}(\text{OH})_2$ се консумира и количеството на С-S-H нараства. Редуцираното количество на $\text{Ca}(\text{OH})_2$ води до увеличаване на дълбочината на карбонизация до 50%, сравнено с обикновения портланд цимент.

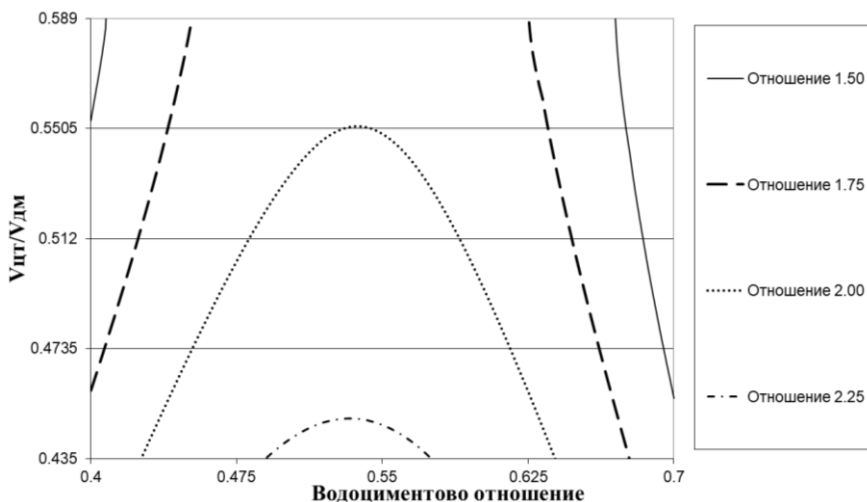
В изследвания случай заместването на цимента с 10% пепел по маса води до нарастване на дълбочината на карбонизация в най-благоприятния случай с $V_{\text{цт}}/V_{\text{дм}} = 1/1,7$ с 31%, докато в най-неблагоприятния случай при $V_{\text{цт}} = 0,55$ и $V_{\text{цт}}/V_{\text{дм}} = 1/2,3$ със 130%.

Влиянието на отделните фактори запазва относително същите закономерности. Водоциментното отношение е основният фактор, определящ скоростта на разпространение

ние на карбонизацията в дълбочина. Най-неблагоприятната за стоманобетонните конструкции среда с оглед на корозията на арматурката и при двата цимента се оказва състав с $V_{\text{цт}}/V_{\text{дм}} = 1/1,7$ и $В/Ц = 0,7$.

Относителното нарастване на дълбочината на карбонизация при използване на смесен с летища пепел цимент се явява при водоциментово отношение в границите $0,48 - 0,55$ при относително нисък обем на циментовото тесто $V_{\text{цт}}/V_{\text{дм}} = 1/2,3$.

Тези закономерности са потвърдени и чрез изолиниите, дадени на фиг. 14.



Фиг. 13. Влияние на факторите върху отношението между дълбочината на карбонизация на неимпрегнирани ПТ с цимент СЕМ I и СЕМ I+10%пепел

3.4. Дълбочина на карбонизация на цимент от Серия 3 – СЕМ I +5% МСП

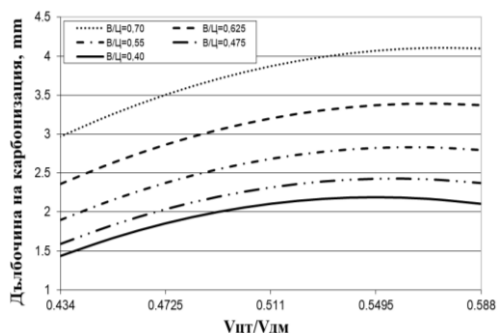
Резултати, получени от проведените изпитвания за определяне на дълбочината на карбонизация на бетони с цимент СЕМ I+5%МСП, са представени в табл. 10. Опитните резултати и теоретичните стойности са зададени в mm. С помощта на математическия модел е изследвано влиянието на всеки фактор върху дълбочината на карбонизация. Вж. фиг. 15 и фиг. 16, както и едновременното действие на комбинация от два фактора. Вж. фиг. 17.

С увеличаване на водоциментовото отношение разпространението на карбонизацията в дълбочина се увеличава по приблизително линеен закон. При $В/Ц = 0,4$ дълбочината на карбонизация се изменя в границите от 1,45 – 2,1 mm, като с нарастването на отношението до 0,7 вече карбонизацията напредва до 3 – 4,1 mm в дълбочина.

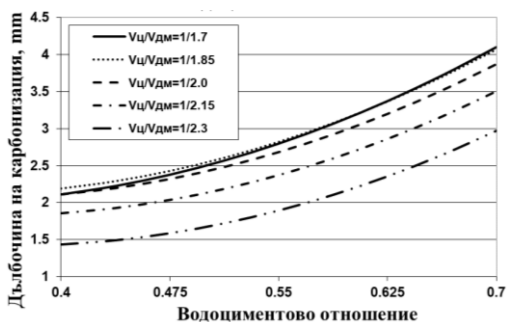
Границите на изменение на дълбочината на карбонизация при различните водоциментни отношения са продиктувани от отношението между циментовото тесто по обем и това на добавъчните материали. И при трите водоциментни отношения наблюдаваме една и съща тенденция. Дълбочината на карбонизация се явява най-голяма при $V_{\text{цт}}/V_{\text{дм}} = 1/1,7$, поради факта, че обемният дял на циментовото тесто е най-голям, атмосферният диоксид влиза във взаимодействия на повърхността с огромен обем калциев хидроксид от циментовия камък, което води до бързото разпространение на карбонизационните процеси в дълбочина.

Таблица 10. Опитни резултати за дълбочината на карбонизация на състави Серия 3

Означение на състава	Опит	Опитни резултати		Опитни резултати – средна стойност	Теоретична стойност	Отклонение %
		Пробно тяло 1	Пробно тяло 2			
СЕМ I +5%МСП 0,7/1,7	1	4,3	3,9	4,10	4,10	0,83
СЕМ I +5%МСП 0,7/2,0	2	3,4	4,1	3,75	3,78	0,90
СЕМ I +5%МСП 0,7/2,3	3	3,2	2,8	3,00	2,97	1,01
СЕМ I +5%МСП 0,55/1,7	4	3,0	2,6	2,80	2,79	0,20
СЕМ I +5%МСП 0,55/2,0	5	2,6	2,7	2,65	2,61	1,47
СЕМ I +5%МСП 0,55/2,3	6	1,9	1,8	1,85	1,89	2,40
СЕМ I +5%МСП 0,4/1,7	7	2,2	2,0	2,10	2,10	0,43
СЕМ I +5%МСП 0,4/2,0	8	2,0	2,1	2,05	2,06	0,25
СЕМ I +5%МСП 0,4/2,3	9	1,5	1,4	1,45	1,44	0,97
Максимално отклонение:						2,40
Средно отклонение:						0,86

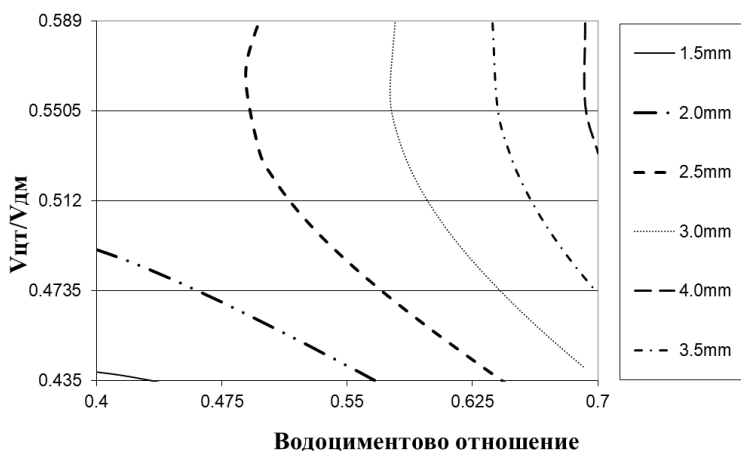


Фиг. 14. Влияние на отношението между обема на компонентите върху дълбочината на карбонизация на състави Серия 3



Фиг. 15. Влияние на водоциментното отношение върху дълбочината на карбонизация на състави Серия 3

При комбинираното действие на двата фактора водещ за развитието на карбонизация в дълбочина се явява водоциментното отношение, а като второстепенен е отношението на циментовото тесто към добавъчните материали по обем. Съчетаването на високо водоциментно отношение (0,7) и голям обем на циментовото тесто при $V_{цт}/V_{дм} = 1/1,7$ води до образуването на най-благоприятната среда за разпространение на процесите на карбонизация в дълбочина, с дълбочина на карбонизация от 4,1 mm.



Фиг. 16. Влияние на факторите върху дълбочината на карбонизацията на неимпрегнирани ПТ с цимент СЕМ I+5%МСП

3.5. Изследване на изменението на дълбочината на карбонизацията във функция на вида на цимента

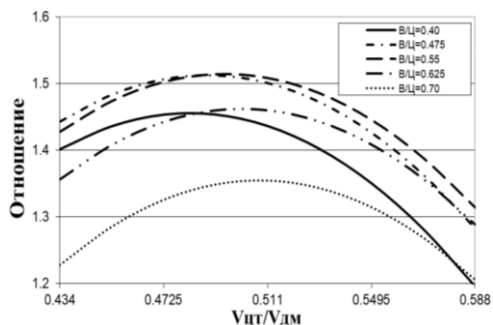
Резултати, получени от проведените изпитвания за изследване на отношението между дълбочината на карбонизацията на бетони с цимент СЕМ I и цимент СЕМ I+10% пепел, са представени в табличен вид. Вж. табл. 11. Опитните резултати и теоретичните стойности са зададени в mm.

Таблица 11. Опитни резултати за отношението между дълбочината на карбонизацията на състави Серия 1 и Серия 3

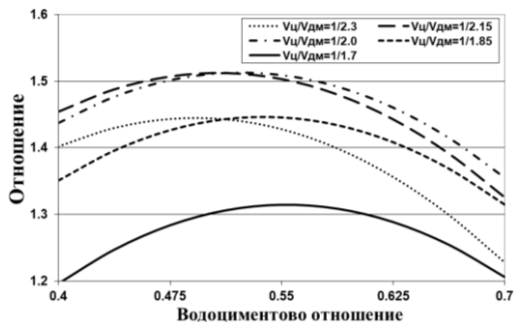
Опит	Състав	Опитни резултати		Отношение СЕМ I+5%МСП към СЕМ I	Теоретична стойност	Отклонение %
		СЕМ I	СЕМ I + 5% МСП			
1	0,7/1,7	3,30	4,10	1,242	1,205	2,95
2	0,7/2,0	2,90	3,75	1,293	1,353	4,66
3	0,7/2,3	2,40	3,00	1,250	1,226	1,88
4	0,55/1,7	2,20	2,80	1,273	1,313	3,21
5	0,55/2,0	1,70	2,65	1,559	1,514	2,87
6	0,55/2,3	1,30	1,85	1,423	1,426	0,27
7	0,4/1,7	1,75	2,10	1,200	1,195	0,35
8	0,4/2,0	1,40	2,05	1,464	1,448	1,06
9	0,4/2,3	1,05	1,45	1,381	1,401	1,42
Максимално отклонение:						4,66
Средно отклонение:						2,07

С помощта на математическия модел е изследвано влиянието на отделните фактори върху дълбочината на карбонизацията. Вж фиг. 18 и фиг. 19, както и едновременното действие на комбинация от два фактора. Вж. фиг. 20.

От получените резултати ясно се вижда, че дълбочината на карбонизация се увеличава с добавянето на МСП. С увеличаването на минералната добавка нараства дълбочината на карбонизацията, сравнено с тази с чистия портланд цимент. При заместването на цимента с 5% микросилициев прах по маса дълбочината на карбонизация нараства от 20% при $V_{\text{Ц}}/V_{\text{ДМ}} = 0,4$ и $V_{\text{ЦТ}}/V_{\text{ДМ}} = 1/1,7$ до 55% при $V_{\text{Ц}}/V_{\text{ДМ}} = 0,55$ и $V_{\text{ЦТ}}/V_{\text{ДМ}} = 1/2$. Резултатите за установената дълбочина на карбонизация с цимент с 5% МСП остават обаче доста близки до тези с базовия цимент, в сравнение със съставите с летяща пепел. Това потвърждава твърденията на редица автори, че с увеличаването на минералната добавка се ускоряват и карбонизационните процеси.



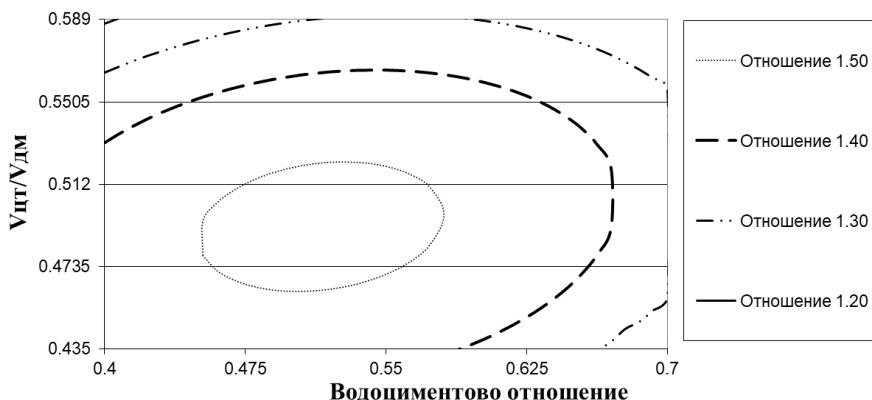
Фиг. 17. Влияние на отношението между обема на компонентите върху изменението на дълбочината на карбонизация при смесени цименти



Фиг. 18. Влияние на водоциментното отношение върху изменението на дълбочината на карбонизация при смесени цименти

Най-неблагоприятен за стоманобетонните конструкции с оглед на корозията на арматурката и при двата цимента се оказва съставът с $V_{\text{ЦТ}}/V_{\text{ДМ}} = 1/1,7$ и $V_{\text{Ц}}/V_{\text{ДМ}} = 0,7$.

Относителното нарастване на дълбочината на карбонизация с около 55% при използване на смесен с микросилициев прах цимент се явява при водоциментово отношение в границите 0,48 – 0,55 при относителен обем на циментовото тесто $V_{\text{ЦТ}}/V_{\text{ДМ}}$ в границите от 1/2,11 до 1/1,95. Тези закономерности са потвърдени и чрез изолиниите, дадени на фиг. 20.



Фиг. 19. Влияние на факторите върху отношението между дълбочината на карбонизация на неимпрегнирани ИТ с цимент СЕМ I и СЕМ I+5%МСП

4. Изводи

Карбонизацията е един от основните фактори, влияещи върху дълготрайността на бетонните конструкции в атмосферна среда. В резултат на проведеното изследване и анализ на получените експериментални резултати могат да се направят следните изводи:

1. Скоростта и интензивността на карбонизация се влияе основно от вида на цимента и стойността на водоциментното отношение.
2. При базовите състави съчетаването на високо водоциментно отношение и относително голям обем на циментовото тесто води до образуването на най-благоприятната среда за разпространение на процесите на карбонизация в дълбочина.
3. Карбонизацията на бетона се редуцира чрез повишаване на минималната якост на бетона, увеличаване на дебелината на бетонното покритие, увеличаване на относителния дял на добавъчните материали, намаляване на В/Ц и др.
4. С увеличаване на количеството на минералната добавка нараства дълбочината на карбонизацията, съответно до 130 % при цименти с 10% летяща пепел и до 50% при цименти с 5% микросилициев прах.
5. При цименти с 10% летяща пепел дълбочината на карбонизация нараства спрямо базовите състави най-много при водоциментно отношение в границите 0,48 – 0,55 при относително нисък обем на циментовото тесто $V_{цт}/V_{дм} = 1/2,3$.
6. При цименти с 5% микросилициев прах дълбочината на карбонизация нараства спрямо базовите състави най-съществено при водоциментно отношение в границите 0,48 – 0,55 и при относителен обем на циментовото тесто $V_{цт}/V_{дм} = 1/2,0$.
7. Установените зависимости могат да бъдат използвани за подобряване на състава на бетона, с цел повишаване на дълготрайността в условията на повишена концентрация на въглероден диоксид във въздуха.

Благодарности

Настоящата научноизследователска разработка по договор Д95/2017 е подкрепена финансово от Центъра за научни изследвания и проектиране при УАСГ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Simenov, Y., Darakchiev, B., Nikolov, I., Abadzhiev, Ts., Nazarski, D., Milkov, S., Krumov, V.* Building Materials, Sofia, 1991 (on Bulgarian).
2. *Kosmatka, S. H., Wilson, M. L.* Design and Control of Concrete Mixtures, Portland Cement Association, 2011.
3. *Papadakis, V.* Estimation of concrete service life, Patras, Greece, 2005.
4. Carbon dioxide uptake during concrete life cycle-state of the art. Björn Lagerblad, Swedish Cement and concrete research institute, Stockholm 2005.
5. *Bary, B., Sellier, A.* Coupled-carbon dioxide-calcium transfer model for carbonation of concrete. Cem. Concr. Res. 34, 1859-1872, 2004.

6. *Castellote, M., Andrade, C., Turrillas, X., Campo, J., Cuello, G. J.* Accelerated carbonation of cement pastes in situ monitored by neutron diffraction Cement and Concrete Research.
7. *Stronach, S. A., Glasser, F. P.* Modelling of the impact of abundant geochemical components on the phase stability and solubility of the CaO-SiO₂-H₂O system at 25 °C, *Advances in Cement Research*, Vol 9, No 36, 167-181, 1997.
8. *Gabrilová, A., Havlica, J., Sahu, S.* Stability of calciumaluminat hydrates in water solution with different pH, *Cem. Conc. Res.*, 21, 1023-1027, 1991.
9. *Lagerblad, B.* Leaching performance of concrete based on samples from old concrete constructions, SKB TR-01-27, Report series of Swedish Nuclear Fuel and Waste Management CO, Stockholm, Sweden, 2001.
10. *Peter, M. A., Muntean, A., Meier, S. A., Böhm, M.* Competition of several carbonation reactions in concrete: A parametric study Centre for Industrial Mathematics, FB 3, University of Bremen, Postfach 330 440, 28334 Bremen, Germany.
11. *Lagerblad, B.* Carbon dioxide uptake during concrete life cycle – State of the art, 2005.
12. *Thomas P. Hills, Fabiana Gordon, Nicholas H. Florin, Paul S. Fennell.* Statistical analysis of the carbonation rate of concrete, *Cement and Concrete Research*, Volume 72, June 2015, Pages 98-107.
13. *Sagues, A., Moreno, E., Morris, W., Andrade, C.* Carbonation in concrete and effect on steel corrosion, Florida, 1997.
14. *Shroder, F., Smolzyk, H. G.* 5th International Symposium on the Chemistry of Cement, pg. 188, Tokio, 1968.
15. *Kirchheim, A. P., Rheinheimer, V., Molin, D. C. C.* Comparative study of white and ordinary concretes with respect of carbonation and water absorption. *Construction and Building Materials*, Volume 84, 1 June 2015, Pages 320-330.
16. *Torgal, F. P., Miraldo, S., Labrincha, J. A., Brito, J.* An overview on concrete carbonation in the context of eco-efficient construction: Evaluation, use of SCMs and/or RAC c a C-TAC, University of Minho, Portugal b CICECO, University of Aveiro, Portugal c ICIST, DECivil-IST, Technical University of Lisbon, Portugal *Construction and Building Materials*.
17. *Hamada, H.* 5th International Symposium on the Chemistry of Cement, pg. 343, Tokio, 1968.
18. *Andrade, C.* Statistical study on simultaneous monitoring of rebar corrosion rate and internal relative humidity in concrete structures exposed to the atmosphere, *SCI, Proc. Of a conference ti be held in Cambridge, UK*, 1995.
19. *Thienel, K. Ch.* Institut für Werkstoffe des Bauwesens Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, *Werkstoffe des Bauwesens. Dauerhaftigkeit von Beton, Frühjahrstrimester 2011.*
20. *Fabbri, A., Corvisier, J., Schubnel, A., Brunet, F., Goffe, B., Rimmele, G., Barlet-Gouedard, V.* Effect of carbonation on the hydro-mechanical properties of Portland cements.
21. BDS EN 197-1:2011 Cement – Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements.
22. BDS EN 12620:2002+A1:2008 Aggregates for concrete.
23. BDS EN 12390-3:2019 Testing hardened concrete – Part 3: Compressive strength of test specimens.

24. BDS EN 12390-7:2019 Testing hardened concrete – Part 7: Density of hardened concrete.
25. BDS EN 12504-4:2005 Testing concrete in structures – Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity.
26. BDS EN 12390-12:2020 Testing hardened concrete – Part 12: Determination of the carbonation resistance of concrete – Accelerated carbonation method.
27. *Kumar, M., Kujur, J.* Accelerated Carbonation Test on Concrete Made with Micro-Silica International Conference on Recent Trends and Challenges in Civil Engineering December 12-14, 2014, MNNIT.
28. BDS EN 14630:2007 Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Test methods – Determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method.

CHANGE IN THE RATE AND DEPTH OF CARBONATION OF CONCRETE IN FUNCTION OF THE FACTORS OF THE CEMENT COMPOSITION AND STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF CONCRETE

B. Petrov¹, G. Alimanova²

Keywords: *concrete, carbonation, durability, cement composition, concrete mix design*

ABSTRACT

The carbonation of concrete is a process of interaction between the Ca(OH)_2 from the cement paste with CO_2 from the air, as a result of which the hydrogen index (pH) of the pore liquid decreases and it is neutralized. In concrete, carbonation is associated with an increase in density, while in reinforced concrete structures – lowering the alkalinity of the cement paste leads to corrosion of the steel reinforcement. The destruction of the passivation layer around the reinforcing bars is carried out by lowering the pH below 11.5.

The paper presents the results of laboratory tests for accelerated carbonation of concrete. The influence of the factors of the cement composition and structure of the concrete on the rate and intensity of the carbonation processes are shown below. The test specimens are prepared with different types of cements, different water-cement ratios, and the different ratio between the volume of the cement paste and the volume of the aggregates. The study additionally examines the influence of different types of impregnation coatings on the rate of development of carbonization processes.

¹ Bogomil Petrov, Prof. Dr. Eng., Dept. “Building Materials and Insulations”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: b_petrov@abv.bg

² Gyulnas Alimanova, Eng., UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: gulnazoa@gmail.com