

**ЦИМЕНТИ С НИСЪК ВЪГЛЕРОДЕН ОТПЕЧАТЪК – ВЪЗМОЖНОСТИ
ЗА ПРОИЗВОДСТВО В БЪЛГАРИЯ - ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА
ПРОГРАМА ЗА УСТАНОВЯВАНЕ НА ВЛИЯНИЕТО НА СМЕСЕНИ
ЦИМЕНТИ, С НИСЪК ВЪГЛЕРОДЕН ОТПЕЧАТЪК ВЪРХУ
ОСНОВНИ ЕКСПЛОАТАЦИОННИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ПРЕСЕН
И ВТВЪРДЕН БЕТОН (ЧАСТ II)**

Иван Ростовски¹

**CEMENTS WITH A LOW CARBON FOOTPRINT – PRODUCTION
OPPORTUNITIES IN BULGARIA - EXPERIMENTAL PROGRAM TO
ESTABLISH THE INFLUENCE OF LOW CARBON FOOTPRINT
BLENDED CEMENTS ON BASIC PERFORMANCE CHARACTERISTICS
OF FRESH AND HARDENED CONCRETE (PART II)**

Ivan Rostovsky

Abstract:

The report presents results from an experimental program to determine the influence of blended cements on the main performance characteristics of fresh and hardened concrete. The program includes five new blended cements that fall within the scope of the BDS EN 197 series of standards, but have not been produced in Bulgaria to date.

The participants in the program worked with the so-called "blind samples", i.e. they were not familiar with the type and subtype of the cement used.

Information is presented on the used constituent materials of the concrete mixture - mineral additives to the cement, additives and chemical additives.

The influence of cement on the characteristics of fresh and hardened concrete - consistence, water demand, air content, compressive strength, density, modulus of elasticity, etc. has been established. The results are summarized and conclusions are drawn about the influence of blended cements on the characteristics of fresh and hardened concrete, recommendations for their application have been prepared.

Keywords:

Blended cements, fresh concrete, hardened concrete

¹ Иван Ростовски, проф. д-р инж., катедра „Строителни материали и изолации“, Строителен факултет, Университет по архитектура, строителство и геодезия, София, бул. „Христо Смирненски“ №1, rostovsky_fce@uacg.bg; Ivan Rostovsky, Prof. Eng. PhD, Department of building materials and insulations, Faculty of Civil Engineering, University of Civil Engineering and Geodesy, Sofia, 1 Hristo Smirnenski blv, University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Изследвани са бетонни смеси и втвърден бетон, за получаването на които са използвани следните смесени цименти (виж първата част на доклада):

- смесен цимент CEM VI/S-LL, със съдържание на клинкер между 35 и 49 %, гранулирана доменна шлака, в количество между 31 и 59 % и смлян варовик, в количество между 6 и 20 % - цимент А;
- смесен портландцимент CEM II/C-M (V-LL), със съдържание на клинкер между 50 и 64 %, силициева летяща пепел и смлян варовик, с общо количество между 36 и 50 % - цимент В;
- смесен портландцимент CEM II/C-M (S-LL), със съдържание на клинкер между 50 и 64 %, смляна гранулирана доменна шлака и смлян варовик, с общо количество между 36 и 50 % - цимент С;
- смесен портландцимент CEM II/C-M (P-LL), със съдържание на клинкер между 50 и 64 %, естествени пуцоланови материали и смлян варовик, с общо количество между 36 и 50 % - цимент D;
- смесен портландцимент CEM II/C-M(Q-LL), със съдържание на клинкер между 50 и 64 %, изкуствени пуцоланови материали (калцинирана глина) и смлян варовик, с общо количество между 36 и 50 % - цимент Е;

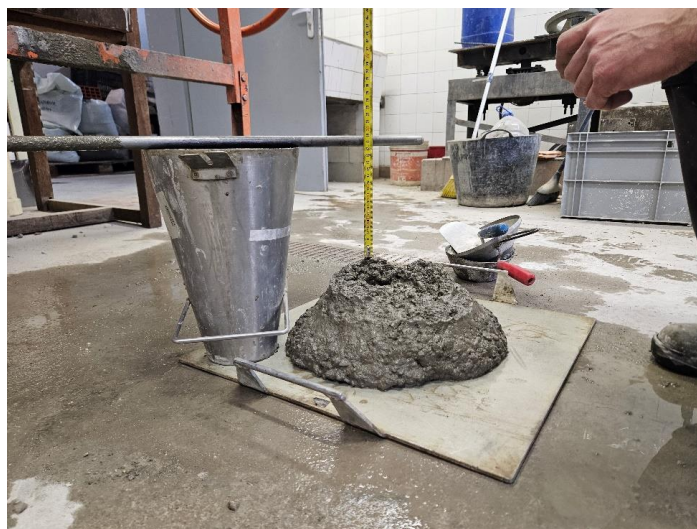
Стандартизирани изпитвания на циментите в рамките на настоящата експериментална програма не са провеждани.

Лабораторните изпитвания на бетонните смеси и изготвянето на пробните тела от втвърден бетон се извършва в Университетската строителна изпитвателна лаборатория (УСИЛ). Пробните тела се разделят на три групи, които се изпитват паралелно в УСИЛ, лаборатория за изпитване към „ЕН ДЖИ ЕН“ ООД, гр. Хасково и „Изпитвателен Център по Строителство (ИЦС) при НИСИ ЕООД.

От всеки цимент са изготвени по два състава – с обикновена якост и с повишена якост, означени съответно с L и H.

2. ВЛИЯНИЕ НА СМЕСЕНИТЕ ЦИМЕНТИ ВЪРХУ ОСНОВНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ПРЕСЕН БЕТОН

Слягането на бетонната смес е получено като средноаритметична стойност от две последователни измервания, проведени в кратък времеви интервал. Използван е метода описан в БДС EN 12350-2 [1], много добре познат в строителната практика като „метод на слягане“ или „метод на Абрамс“ – фигура 1.



Фигура 1 Определяне на слягане на бетонна смес от серията за изпитване

Количеството на водата за бетон, при двата състава – с обикновена якост и с повишена якост се поддържа постоянно. Водопотребността на отделните цименти се оценява количествено по дозировката на химичната добавка (в % от масата на цимента), необходима за получаване на бетонна смес с предварително зададена подвижност – около 180 mm, т.е. масово използваната подвижност на бетонна смес, при полагане с бетон помпа.

Съдържанието на въздух в % по обем е измерено по компресионен метод (БДС EN 12350-7) [2], като е използван уред с воден стълб – на фигура 2.



Фигура 2 Определяне на съдържанието на въздух, съгласно БДС EN 12350-7

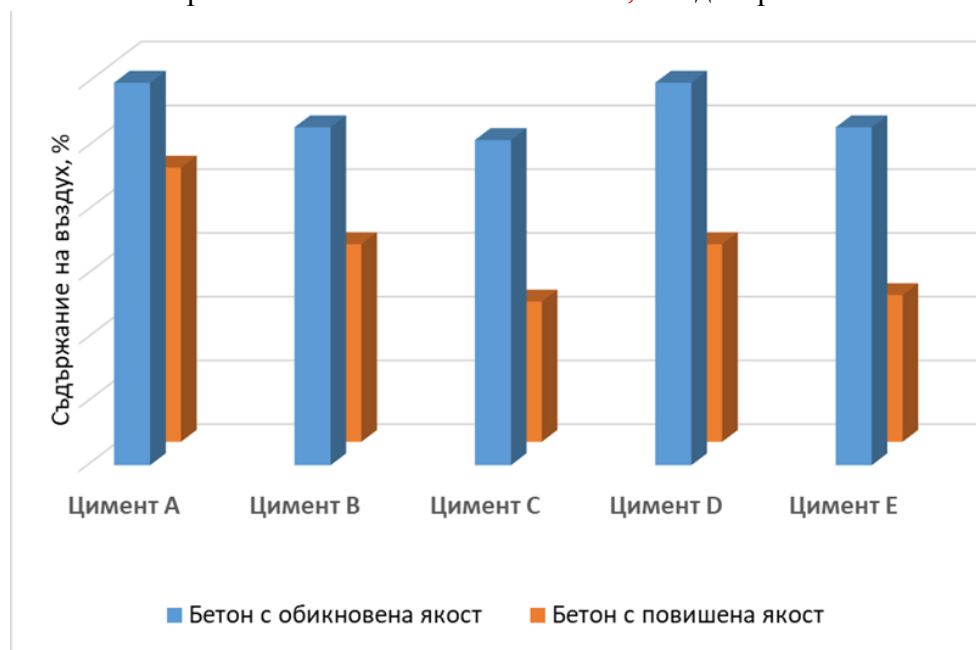
Резултатите от изпитване са показани в табличен и графичен вид.

Таблица 1. Резултати от изпитване на бетонни смеси, получени от различните цименти, използвани в експерименталната програма

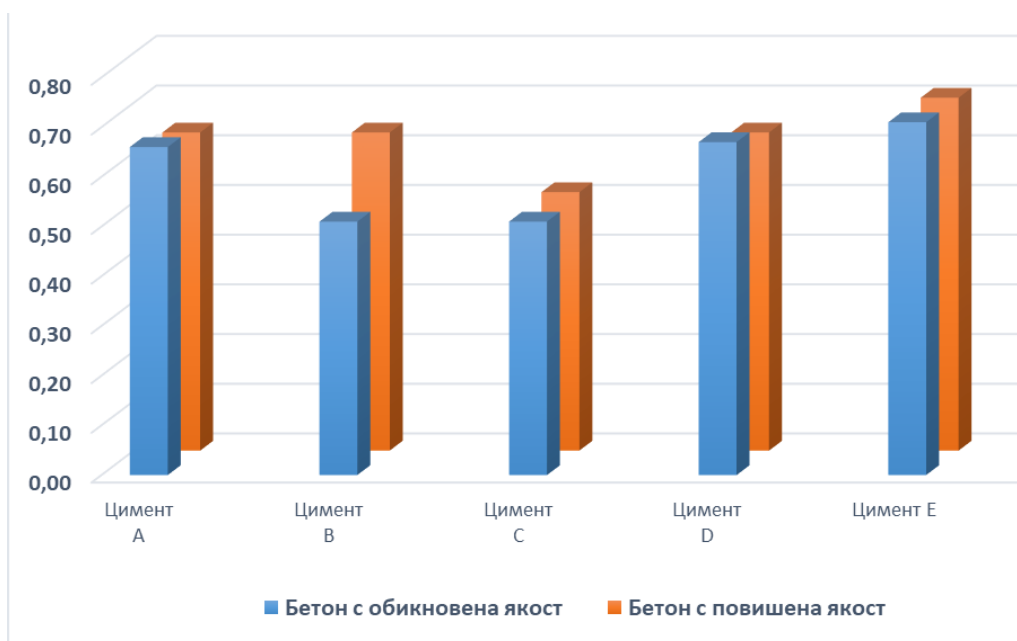
	Цимент А	Цимент В	Цимент С	Цимент D	Цимент Е
Бетон	Слягане, mm				
L	179	181	191	171	171
H	162	173	201	173	181
	Съдържание на въздух, % по обем				
L	6,0	5,3	5,1	6,0	5,3
H	4,3	3,1	2,2	3,1	2,3
	Химична добавка, %				
L	0,66	0,51	0,51	0,67	0,71
H	0,64	0,64	0,52	0,64	0,71

Резултатите от изпитване позволяват да се направят следните предварителни изводи:

- При всички изпитани бетонни смеси се получава измеримо слягане на бетонната смес, без видими следи от водоотделяне и разслояване на сместа, като при всички случаи слягането попада в клас S4, съгласно БДС EN 206:2012+A2:2021 [3];
- При всички изследвани цименти се наблюдава намаляване на количеството на въздуха при смесите, предназначени за бетони с повишена якост, в сравнения, с тези – за обикновена якост;
- Като цяло водопотребността на циментите надвишава прогнозите, които са заложили в първоначалните състави на бетона, т.е. дозировката в по-висока.



Фигура 3 Съдържание на въздух в бетонните смеси



Фигура 4 Дозировка на химична добавка в бетонните смеси

3. ВЛИЯНИЕ НА СМЕСЕНИТЕ ЦИМЕНТИ ВЪРХУ ОСНОВНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ВТВЪРДЕН БЕТОН

3.1. Якост на натиск

Якостта на натиск на бетоните, е определена на възраст 7, 28 и 90 дни. Резултатите са представени в табличен вид по-долу. В знаменател е показано изменението на якостта на бетона в диапазона от 7-ден до 28-ден и от 28-ден до 90-ден.

Таблица 2. Якост на натиск на втвърдения бетон и изменение във времето

	Цимент А	Цимент В	Цимент С	Цимент D	Цимент Е
	Якост на натиск на 7 ден, N/mm ²				
L	18,6	20,8	19,9	25,3	26,5
H	26,7	32,0	27,1	35,3	42,6
	Якост на натиск на 28 ден, N/mm ² /нарастване спрямо 7 ден, %				
L	<u>29,4</u> +58,2	<u>28,7</u> +36,7	<u>28,6</u> +43,5	<u>32,1</u> +26,9	<u>38,6</u> +45,7
H	<u>38,7</u> +44,9	<u>42,0</u> +31,0	<u>36,2</u> +33,7	<u>43,1</u> +22,1	<u>52,7</u> +23,7
	Якост на натиск на 90 ден, N/mm ² /нарастване спрямо 28 ден, %				
L	<u>34,1</u> +15,9	<u>36,0</u> +25,7	<u>31,4</u> +9,8	<u>33,5</u> +4,5	<u>44,4</u> +15,0
H	<u>45,1</u> +16,4	<u>49,4</u> +17,6	<u>43,1</u> +19,2	<u>47,9</u> +11,3	<u>61,7</u> +17,1

Въз основа на показаните в Таблица 2 резултати може да се направят следните по-важни обобщения:

- Всички изследвани цименти се характеризират със значително нарастване на якостта на натиск на възраст по-късна от 7 денонощия. Най-голямо е изменението при цимент А, между 7 и 28-ден, а при цимент В – между 28 – 90-ден;
- Най-ниска якост, като цяло, показват цименти А и С, а най-висока - цимент Е.

3.2. Водонепропускливост

Водонепропускливостта на бетоните е определена на 28-дневна възраст, върху три броя цилиндрични пробни тела, с диаметър на основата и височина 150 mm. Използван е популярния метод, описан в БДС EN 206:2013+A2:2021/NA:2021 [4].

Таблица 3. Водонепропускливост на бетоните от експерименталната програма

Цимент: Водонепропускливост	Цимент А	Цимент В	Цимент С	Цимент D	Цимент Е
L	Клас C _w 0,8	Клас C _w 0,8	Клас C _w 0,8	Клас C _w 0,8	Клас C _w 0,8
H	Клас C _w 1,0	Клас C _w 1,0	Клас C _w 1,0	Клас C _w 1,0	Клас C _w 1,0

Както става ясно от получените резултати, които са обобщени в таблица 3, с използваните в експерименталната програма цименти могат да се получат всички класове

по водонепропускливост, в обхвата на БДС EN 206:2013+A2:2021/NA:2021, като трябва да се подчертае – с използване на силноводонамаляващи химични добавки. Може да се кажа, че изпитаните цименти са годни за производство на бетони, които ще работят в контакт с вода, при положителна температура, в това число за приложение в геотехниката.

3.3. Мразоустойчивост по ускорен метод

Предвид завишената трудоемкост и разход на време при използването на класическия метод за определяне на мразоустойчивост, логично е да бъде избран ускорения метод за изпитване, който допълнително е показал своята надеждност през последните години. Получените резултати са резюмирани в таблица 4.

Таблица 4. Мразоустойчивост на бетоните от експерименталната програма

	Цимент А	Цимент В	Цимент С	Цимент D	Цимент Е
Бетон с обикновена якост (L)	Клас C _{fr} 100	Клас C _{fr} 100	Клас C _{fr} 150	Клас C _{fr} 100	Клас C _{fr} 100
Бетон с повишена якост (H)	Клас C _{fr} 150	Клас C _{fr} 200	Клас C _{fr} 150	Клас C _{fr} 150	Клас C _{fr} 200

Добре известно е, че предвид по-високата им водопотребност, смесените цименти не се препоръчват за производство на бетони, работещи в условията на циклично „замразяване – размразяване“ и силно водонасищане – класове XF 3 и XF 4, съгласно БДС EN 206:2013+A2:2021.

Резултатите, получени в рамките на настояща експериментална програма, показват, че чрез използване на смесени цименти е възможно да се получат бетони с достатъчна мразоустойчивост – класове C_{fr}150 и C_{fr}200, при завишено количество цимент. Препоръчително е използването на въздуховъвличащи химични добавки.

3.4. Модул на еластичност при натиск

Най-съществено влияние върху модульта на еластичност при натиск на бетона оказват добавъчните материали, тъй като те имат най-голям относителен дял в състава. Тази информация се потвърждава и от настоящото изследване.

Таблица 5 Модул на еластичност при натиск на изследваните бетони, GPa

	Цимент А	Цимент В	Цимент С	Цимент D	Цимент Е
Бетон с обикновена якост – 28 дни	22,7	24,5	26,0	26,2	25,7
Бетон с повишена якост – 28 дни	27,5	27,1	28,0	26,9	31,4
Бетон с обикновена якост – 90 дни	23,8	32,3	29,6	27,9	26,3
Бетон с повишена якост – 90 дни	28,9	30,5	31,5	29,9	30,7

Както е видно от таблицата, модульта на еластичност при натиск в общо линии следва изменението на якостта на натиск. Тук трябва да се подчертае, че пробните тела се изпитват във водонаситено състояние, което води до намаляване на големината на модула, в по-голяма степен, при циментите, които съдържат естествени пуцоланови добавки.

3.5. Дълбочина на карбонизация

Карбонизацията е процес, при който портландита **във втвърдената** циментова паста взаимодейства с въглеродния диоксид от въздуха, при което се формира калциев карбонат (калцит). Скоростта на това взаимодействие се определя от редица фактори, като главните са проникваемостта на бетона и концентрацията на CO_2 . Във времето, карбонизацията се забавя, тъй като достъпът на CO_2 в дълбочина на бетона става все по-труден. С цел ускоряване на процеса по оценка на склонността към карбонизация, бяха използвани пробни тела с по-малки размери (призми 40/40/160 mm), които се съхраняват в камера с повишено съдържание на въглероден диоксид.

Таблица 6 Дълбочина на карбонизация на пробните тела

	Цимент А	Цимент В	Цимент С	Цимент D	Цимент Е
Цименто-пясъчен разтвор с водоциментно отношение 0,60	3,8	4,6	5,0	3,6	3,2
Цименто-пясъчен разтвор с водоциментно отношение 0,45	2,1	1,4	2,6	1,0	2,5



Фигура 5 Карбонизация на разтвор от експерименталната програма

Както става ясно от получените резултати, дълбочината на карбонизация следва плътността на изпитваните разтвори, като рязко намалява, при редуция на водоциментното отношение, което е основен фактор определящ порьозността на разтворите. Тъй като разтворите са на една и съща възраст, и се съхраняват едновременно в камерата, останалите фактори, които влияят на карбонизацията са уеднаквени за всички пробни тела.

3.6 Дифузия на хлорни йони

Определянето на специфичното съпротивление на влажен бетон при преминаване през него на електричен ток се използва като индиректен метод за определяне на устойчивостта му срещу проникване на хлорни йони, чрез дифузия. Основно предимство на метода е бързината за получаване на резултатите – напълно възможно е да се получи

резултат в рамките на минути (около 5), без да се налага изрязване на ядки от бетона или нарушаване на целостта (интегритета) на конструкцията.

Методът е регламентиран в AASHTO T358-24 Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration [5], който е идентичен с БДС EN 12390-19, т.8. Използва се т. нар. Венеров метод с четири еднакви електрода, разположени през равно разстояние

Стандартът AASHTO T358 е пригоден за работа с цилиндрични пробни тела, като са дадени насоки за тълкуване на резултатите (в БДС EN 12390-19 [6], няма подобни указания) – виж таблица 7. **Error! Reference source not found.**

Таблица 7 Съпротивление срещу дифузия на хлорни йони, в зависимост от специфичното съпротивление

Дифузия на хлорни йони	Електросъпротивление на повърхността (kΩ - cm)	
	Цилиндър 100x200mm a = 1,5	Цилиндър 150x300mm a = 1,5
Висока	< 12	< 9.5
Умерена	12 - 21	9.5 – 16.5
Ниска	21 - 37	16.5 - 29
Много ниска	37 - 254	29 - 199
Пренебрежима	> 254	> 199

Резултатите от изпитване са представени в таблица 8.

Таблица 8 Специфично съпротивление на изследваните бетони

	Цимент А	Цимент В	Цимент С	Цимент D	Цимент Е
Бетон с обикновена якост (L)	46	33	19	15	16
Бетон с повишена якост (H)	83	35	29	20	19

Резултатите, показани в таблицата, показват повишената устойчивост на дифузия на хлорни йони на смесените цименти, като всички изследвани бетони имат умерена устойчивост на дифузия или по-висока от умерената. Както при карбонизацията, така и при настоящото изпитване, с увеличаване на непроницаемостта на бетона, респ. с намаляване на водоциментното отношение, устойчивостта нараства.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Въз основа на получените резултати, може да се направи обосновано заключение, че изследваните цименти са годни за производство на обикновени бетони, като при всички случаи трябва да се отчитат условията на работа на бетона (клас по въздействие на околната среда).

Въз основа на натрупан опит от изпитването на различни състави на бетон може да се каже, че по отношение на якостта на натиск, изпитваните цименти показват известно изоставане в сравнение с обикновения цимент (CEM I), което би могло да се компенсира с увеличаване на дозировката за кубичен метър бетон, в рамките на 10 – 15 %. Това в

повечето случаи води до подобрена обработваемост на бетонните смеси, намалена склонност към разслояване и водоотделяне, както и до получаване на по-качествени отливки на бетонните елементи.

Модулът на еластичност на бетоните, с изследваните цименти, има стойности, които не се отличават съществено от този, на други бетони, които се произвеждат в България.

Получените резултати показват, че със смесени цименти, безпроблемно се получават всички класове по водонепропускливост на бетона, които се използват в строителната практика у нас.

Когато се очаква бетонът да се намира в условия на циклично замразяване – размразяване, при използване на смесени цименти, е препоръчително да се завиши количеството на цимента с около 10 – 15 %, спрямо обикновен цимент и да се използват въздуховъвличащи добавки.

Устойчивостта срещу протичане на карбонизация на бетоните със смесени цименти е съпоставима с тази на обикновения цимент (малко по-ниска), поради по-ниското съдържание на клинкер, респективно намалено съдържание на калциев хидроксид в бетона. Поради това, при бетони, работещи във влажна среда е препоръчително да се завиши количеството на цимента с около 10 – 15 %, спрямо обикновен цимент и да се използват силноводоулавящи химични добавки – за намаляване на порьозността.

Устойчивостта на проникване на хлорни йони на смесените цименти (без варовиковите) е по-висока от тази на обикновения цимент, поради по-високата непроницаемост на хидратните продукти.

Въз основа на получените резултати могат да се препоръча използването на изпитваните цименти в хидротехническото, геотехническото и гражданското строителство, както и за производство на строителни разтвори и сухи смеси, с различно приложение.

БЛАГОДАРНОСТИ

Изпълнението на експерименталната програма е подкрепено от Българска асоциация на циментовата индустрия (БАЦИ). Пробните тела са изготвени и голяма част от изпитванията са проведени от състава на Университетска строителна изпитвателна лаборатория (УСИЛ).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] БДС EN 12350-2:2019 Изпитване на бетонна смес. Част 2: Изпитване на слягане;
- [2] БДС EN 12350-7:2019 Изпитване на бетонна смес. Част 7: Определяне на съдържанието на въздух. Методи с налягане;
- [3] БДС EN 206:2013+A2:2021 Бетон. Спецификация, свойства, производство и съответствие;
- [4] БДС EN 206:2013+A2:2021/NA:2021 Бетон. Спецификация, свойства, производство и съответствие. Национално приложение (NA);
- [5] AASHTO T358-24 Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration;
- [6] БДС EN 12390-19:2023 Изпитване на втвърден бетон. Част 19: Определяне на електрическо специфично съпротивление;