

УДК 666.9.015.427: 666.9.015.45

Тип статьи: научная статья

ГРНТИ 61.35.33

Научная специальность ВАК: 2.6.14 Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов (технические науки)

СОСТАВ, СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ГИДРАТИРОВАННОГО БЕЛОГО ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА С ДИОКСИДОМ ТИТАНА

Гребенюк А.А.¹, Ерошенко Т.С.¹, Борисов И.Н.¹, Вагин С.А.²

¹ Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

² ООО «Техпромжиниринг»

АННОТАЦИЯ

Белый портландцемент успешно применяется для возведения архитектурных сооружений и декорирования фасадов зданий, а также служит основным компонентом многих сухих строительных смесей, применяемых для внутренней отделки помещений. В данном исследовании изучено влияние высокодисперсного порошка AEROXIDE TiO₂ P25 с удельной поверхностью равной 50 м²/г на состав, структуру и свойства гидратированного белого портландцемента. В работе использовались два вида белых цементов, отличающихся минералогическим составом. Показано, что скорость формирования продуктов гидратации, установленная при помощи рентгенофазового анализа, количества образованного портландита и степени гидратации, при вводе высокодисперсного порошка диоксида титана увеличивается и достигает 88-90 %, что на 3-5 % больше, чем у контрольных бездобавочных образцов. Установлено, что присутствие TiO₂ в составе затворенных цементов оказывает влияние на микроструктуру цементного камня: распределение кристаллогидратов становится более равномерным, а их размер уменьшается с 10-35 мкм до 8-22 мкм. Наличие в составе цементов диоксида титана придает им эффект самоочищения, в результате чего уже после 4 часов обработки поверхности УФ-излучением она очищается от внешнего загрязнителя на 67-80 %. Оптимальным количеством ввода диоксида титана в состав белых цементов можно считать 1 %, что обеспечивает сопоставимые с бездобавочными составами прочностные характеристики.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: белый цемент, диоксид титана, микроструктуру цементного камня, эффект самоочищения

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Гребенюк А.А. Состав, структура и свойства гидратированного белого портландцемента с диоксидом титана / Гребенюк А.А., Ерошенко Т.С., Борисов И.Н., Вагин С.А. // Техника и технология силикатов. – 2024. – Т. 31, № 1. – С. 77-87.

Type of article - scientific article

OECD 2.04 Chemical engineering

II ENGINEERING, CHEMICAL

COMPOSITION, STRUCTURE AND PROPERTIES OF HYDRATED WHITE PORTLAND CEMENT WITH TITANIUM DIOXIDE

Grebenuik A.A.¹, Eroshenko T.S.¹, Borisov I.N.¹, Vagin S.A.²

¹ Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova

² Tekhprominzhiniring LLC

ABSTRACT

White Portland cement is successfully used for the construction of architectural structures and decoration of building facades, and also serves as the main component of many dry building mixtures used for interior decoration. In this study, the effect of highly dispersed powder AEROXIDE TiO₂ P25 with a specific surface area of 50 m²/g on the composition, structure and properties of hydrated white Portland cement was investigated. Two types of white cements differing in mineralogical composition were used in the work. It is shown that the rate of formation of hydration products, established by X-ray phase analysis, the amount of formed portlandite and the degree of hydration, with the introduction of highly dispersed powder of titanium dioxide increases and reaches 88-90%, which is 3-5% more than in control samples without addition. It was found that the presence of TiO₂ in the composition of the set cement influences the microstructure of cement stone: the distribution of crystalline hydrates becomes more uniform, and their size decreases from 10-35 microns to 8-22 microns. The presence of titanium dioxide in the composition of cements gives them the effect of self-cleaning, as a result of which after 4 hours of surface treatment with UV radiation it is cleaned from external contaminant by 67-80%. The optimum amount of titanium dioxide in white cements can be considered as 1 %, which provides comparable strength characteristics with non-supplemented compositions.

KEY WORDS: white cement, titanium dioxide, cement stone microstructure, self-cleaning effect

FOR CITATION: Grebenuik A.A. Composition, structure and properties of hydrated white Portland cement with titanium dioxide / Grebenuik A.A., Eroshenko T.S., Borisov I.N., Vagin S.A. // Technique and technology of silicates. – 2024. Vol. – 31, No1. – Pp. 77 – 87.

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение комфортной среды обитания человека в настоящее время является первостепенной задачей строительной отрасли. Для этого выбираются материалы, удовлетворяющие не только экономическим требованиям, но и эстетическим. Белый портландцемент в данном аспекте успешно применяется для возведения архитектурных сооружений и декорирования фасадов зданий. Белый портландцемент нашел широкое применение в составе многих сухих строительных смесей, применяемых для внутренней отделки помещений [1, 2].

Основная характеристика белого портландцемента степень белизны может изменяться в достаточно широких пределах. В технологическом процессе степень белизны зависит от пигментирующих соединений в составе сырьевой смеси, протекания обжига клинкера и его охлаждения, а также дисперсионного состава белого цемента [3-5].

Сохранение белизны поверхностей объектов на основе белого цемента является главной задачей в технологии строительного материаловедения, поскольку из-за накопления на поверхности цементного камня пыли и органических загрязнителей они с течением времени теряют свою былую белизну.

Эффективным способом очистки поверхности объектов на основе белого портландцемента может служить введение в его состав добавок-фотокатализаторов, которые за счет преодоления энергетического барьера при УФ-излучении способствуют ускорению фотохимической реакции разложения органических соединений с последующим образованием углекислого газа и воды [6-11]. Эффективное действие фотокатализатора проявляется при соблюдении ряда требований [11,12]:

- свет должен быть поглощен фотокатализатором с учетом электрон-дырочных пар;
- процесс миграции электронов и дырок к реакционному центру должен доминировать над процессом их массовой рекомбинации;
- процессы поверхностной рекомбинации должны быть снижены; при проведении термодинамически невыгодных реакций в отсутствие света необходимо создавать условия для разделения центров окисления и восстановления;
- материал фотокатализатора должен быть стабилен в реакционных условиях.

Наиболее распространенным на сегодняшний день полупроводником для реакций фотохимического очищения выступает диоксид титана, что обусловлено его высокой эффективностью и относительно низкой стоимостью. Количество ввода TiO_2 в состав цемента зависит от его характеристик и условий эксплуатации объекта и может изменяться от 1 до 10 % [13-16]. Увеличение содержания диоксида титана в составе цемента способствует росту фотокаталитической способности поверхности цементного камня, но снижает его прочностные свойства [10,11, 17].

Как установлено, введение TiO_2 влияет на гетерогенное зародышеобразование и повышает скорость гидратации цемента [11, 17], а также изменяет качественный состав цементного камня ввиду образования гидротитанатов кальция и заполнения порового пространства в структуре цементной матрицы мелкодисперсным наполнителем – порошком TiO_2 [18,19].

INTRODUCTION

Providing a comfortable human environment is currently the primary task of the construction industry. For this purpose, materials are chosen that meet not only economic requirements, but also aesthetic ones. White Portland cement in this aspect is successfully used for the construction of architectural structures and decoration of building facades. White Portland cement is widely used in the composition of many dry building mixtures used for interior decoration [1, 2].

The main characteristic of white Portland cement is the degree of whiteness, which can vary over a wide range. In the technological process, the degree of whiteness depends on the pigmenting compounds in the raw material mixture, clinker burning and cooling, as well as the dispersion composition of white cement [3-5].

Preserving the whiteness of the surfaces of white cement-based objects is a major challenge in building materials technology, as they lose their former whiteness over time due to the accumulation of dust and organic pollutants on the surface of cement stone.

An effective way to clean the surface of objects based on white Portland cement can be the introduction of additives-photocatalysts, which due to overcoming the energy barrier at UV-irradiation contribute to the acceleration of the photochemical reaction of decomposition of organic compounds with the subsequent formation of carbon dioxide and water [6-11]. The effective action of the photocatalyst is manifested if a number of requirements are met [11,12]:

- light should be absorbed by the photocatalyst taking into account electron-hole pairs;
- the process of migration of electrons and holes to the reaction center should dominate over the process of their mass recombination;
- surface recombination processes should be reduced; when thermodynamically unfavorable reactions are carried out in the absence of light, it is necessary to create conditions for separation of oxidation and reduction centers;
- photocatalyst material should be stable under reaction conditions.

The most common semiconductor for photochemical purification reactions today is titanium dioxide, which is due to its high efficiency and relatively low cost. The amount of TiO_2 input in the cement composition depends on its characteristics and operating conditions of the object and can vary from 1 to 10% [13-16]. Increasing the content of titanium dioxide in the cement composition contributes to the growth of photocatalytic ability of the cement stone surface, but reduces its strength properties [10,11, 17].

It was found that the introduction of TiO_2 affects heterogeneous nucleation and increases the rate of cement hydration [11, 17], as well as changes the qualitative composition of cement stone due to the formation of calcium hydrotitanates and filling the pore space in the structure of the cement matrix with fine aggregate - TiO_2 powder [18, 19].

Previously, we found that the optimal amount of TiO_2 input in the composition of white Portland cement can be

Ранее нами было установлено, что оптимальным количеством ввода TiO_2 в состав белого портландцемента можно считать диапазон от 1 до 5 % [20]. Такое количество диоксида титана в составе цемента позволяет цементному камню сохранять его прочности и обеспечивает необходимый эффект самоочищения [11].

Цель научно-исследовательской работы: изучение состава, структуры и свойств гидратированного белого портландцемента с диоксидом титана и способность цементного камня на его основе к самоочищению от внешних загрязнителей.

Материалы и методы исследования

В качестве объектов исследования использовали белые портландцементы марки ПЦБ-1-500-Д0 египетского (ПЦБ-Египет) и турецкого (ПЦБ-Турция) производства. Данные виды цементов согласно сертификату соответствия по белизне, прочностным характеристикам и химическому составу соответствуют ГОСТ 965-89. Химический состав белых цементов представлен в таблице 1. Расчетный минералогический состав цементов и их модульные характеристики приведены в таблице 2.

Влияние порошка AEROXIDE TiO_2 P25 на состав, структуру и свойства гидратированного белого портландцемента и его фотокаталитическую активность устанавливали при помощи физико-химических методов анализа.

considered to be in the range from 1 to 5 % [20]. Such an amount of titanium dioxide in the cement composition allows the cement stone to preserve its strength and provides the necessary self-cleaning effect [11].

The purpose of the research work: study of composition, structure and properties of hydrated white Portland cement with titanium dioxide and ability of cement stone on its basis to self-cleaning from external pollutants.

Materials and methods

As objects of the study, we used white Portland cement of PCB-1-500-D0 grade of Egyptian (PCW-Egypt) and Turkish (PCW-Turkey) production. These types of cements according to the certificate of conformity on whiteness, strength characteristics and chemical composition correspond to GOST 965-89. Chemical composition of white cements is presented in Table 1. Calculated mineralogical composition of cements and their modular characteristics are given in Table 2.

The effect of AEROXIDE TiO_2 P25 powder on the composition, structure and properties of hydrated white Portland cement and its photocatalytic activity was determined by physicochemical methods of analysis.

ТАБЛИЦА 1. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЦЕМЕНТОВ
Table 1. Chemical composition of cements

Вид цемента Type of cement	Содержание оксидов, % Oxide content, %									
	П.п.п. Losses	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Cl	R ₂ O	CaO _{св}
ПЦБ-Египет PCW-Egypt	0,74	20,13	4,85	3,83	62,29	1,13	6,18	0,01	0,72	3,07
ПЦБ- Турция PCW-Turkey	0,81	11,09	27,97	5,43	46,96	1,34	6,38	0,07	0,01	2,67

ТАБЛИЦА 2 РАСЧЕТНЫЙ МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЦЕМЕНТОВ И ИХ
МОДУЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Table 2 The calculated mineralogical composition of cements and their modular characteristics

Вид цемента Type of cement	Содержание минералов, % Mineral content, %							Модульные характеристики Modular characteristics		
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	MgO	CaO _{св}	CaSO ₄	КН	n	p
ПЦБ-Египет PCW-Egypt	56,96	28,66	6,35	0,82	0,25	3,07	2,76	0,91	8,81	9,48
ПЦБ- Турция PCW-Turkey	45,03	32,19	11,25	0,67	1,34	2,67	2,85	0,88	5,02	19,91

Порошок диоксида титана AEROXIDE TiO_2 P25 производства Evonik Industries AG (Германия) на 99,5 % представлен TiO_2 . Согласно рентгенофазовому анализу в составе порошка присутствуют фазы анатаза и рутила при отсутствии дифракционных отражений второстепенных минералов. Порошок диоксида титана имеет высокую удельную поверхность равную 50 м²/г, при небольшом среднем размере частиц равном 21 нм.

Titanium dioxide powder AEROXIDE TiO_2 P25 produced by Evonik Industries AG (Germany) is 99.5% TiO_2 . According to X-ray phase analysis in the powder composition there are phases of anatase and rutile in the absence of diffraction reflections of minor minerals. Titanium dioxide powder has a high specific surface area of 50 м²/g, with a small average particle size of 21 nm.

TiO_2 oxide was added to each of the white cements in amounts of 1% and 5%. Homogenization of the binder

Оксид TiO_2 вводился в каждый из белых цементов в количестве 1 и 5 %. Гомогенизация составов вяжущих материалов осуществлялась в фарфоровой мельнице в течение 120 минут.

Фазовый состав белых цементов материалов, а также продуктов их гидратации в разные сроки твердения и набора прочности производили посредством порошковой рентгеновской дифракции на дифрактометре ARL X'TRA Thermo Fisher Scientific в диапазоне двойных углов $4-64^\circ$ с последующей расшифровкой дифракционных отражений на основе картотеки международной базы данных International Centre for Diffraction Data.

Химический состав применяемых белых портландцементов и высокодисперсного порошка диоксида титана устанавливали при помощи рентгенофлуоресцентного спектрометра серии ARL 9900 WorkStation посредством пересчета элементарного состава пробы на оксидный согласно стехиометрическим соотношениям. Содержание свободного оксида кальция в цементах определялось согласно ГОСТ 5382-2019 этиленово-глицератным методом.

Способность белого портландцемента к самоочищению после ввода высокодисперсного диоксида титана в его состав оценивали согласно ГОСТ Р 57255-2016 по изменению статического краевого угла смачивания после воздействия УФ-излучения на поверхность, на которую была нанесена олеиновая кислота.

Микроструктура цементного камня изучалась на электронном микроскопе TESCAN MIRA 3 LMU в режиме работы детекторов вторичных и обратно-отраженных электронов. Химический состав образованных кристаллогидратов устанавливался посредством энергодисперсионного анализа.

Результаты и их обсуждение.

Ранее нами было показано, что введение в состав белых портландцементов высокодисперсного порошка диоксида титана существенно влияет на свойства цементного раствора: увеличивается на 1,6-4,5 % нормальная плотность, сокращаются на 6-15 минут сроки схватывания, водоотделение снижается на 4-10 % [20].

Как было установлено диоксид титана влияет на гидратационную активность белых портландцементов: тепловой эффект адсорбционной стадии, увеличивается на 15-20 %, а индукционный период протекания реакции сокращается в среднем на 30-40 минут, а протекание основной стадии гидратации цемента интенсифицируется [20].

В данном исследовании изучение влияния диоксида титана на процессы гидратации проводилось рентгенофазовым анализом образцов из белых портландцементов, твердевших в различные периоды гидратации.

На начальном этапе гидратации (в 2-х суточном возрасте), согласно полученным результатам рентгенофазового анализа, состав всех исследуемых образцов белого цемента представлен следующими продуктами гидратации: этtringитом ($d = 0,977; 0,568$ нм), портландитом ($d = 0,263; 0,493; 0,312$ нм) и низкоосновными гидросиликатами кальция (обширная область дифракционных отражений в диапазоне двойных углов от 25 до 37 град.). На дифрактограммах также присутствуют не вступившие в реакцию с водой фазы алита ($d = 0,304; 0,278; 0,261$ нм), белита ($d = 0,289; 0,278; 0,219$ нм), а в составах с добавлением высокодисперсного порошка диоксида титана также и анатаз ($d = 0,353$ нм).

compositions was carried out in a porcelain mill for 120 minutes.

The phase composition of white cement materials, as well as their hydration products at different curing and strength gaining times was carried out by means of powder X-ray diffraction on ARL X'TRA Thermo Fisher Scientific diffractometer in the range of double angles $4-64^\circ$ with the subsequent interpretation of diffraction reflections on the basis of the card index of the International Centre for Diffraction Data international database.

The chemical composition of the used white Portland cement and highly dispersed titanium dioxide powder was determined using X-ray fluorescence spectrometer of ARL 9900 WorkStation series by means of conversion of elemental composition of the sample to oxide composition according to stoichiometric ratios. The content of free calcium oxide in cements was determined by ethylene-glycerate method according to GOST 5382-2019.

The self-cleaning ability of white Portland cement after the introduction of highly dispersed titanium dioxide into its composition was evaluated according to GOST R 57255-2016 by the change in the static wetting edge angle after exposure to UV radiation on the surface to which oleic acid was applied.

The microstructure of cement stone was studied on the TESCAN MIRA 3 LMU electron microscope in the mode of operation of secondary and back-reflected electron detectors. The chemical composition of the formed crystalline hydrates was determined by energy dispersive analysis.

Results and their discussion.

Earlier we have shown that the introduction of highly dispersed titanium dioxide powder into the composition of white Portland cements significantly affects the properties of cement mortar: the normal density increases by 1.6-4.5 %, setting time is reduced by 6-15 minutes, water separation is reduced by 4-10 % [20].

As it was established titanium dioxide affects the hydration activity of white Portland cement: the thermal effect of the adsorption stage increases by 15-20 %, and the induction period of the reaction decreases on average by 30-40 minutes, and the course of the main stage of cement hydration is intensified [20].

In this study, the influence of titanium dioxide on hydration processes was studied by X-ray diffraction analysis of white Portland cement samples hardened during different hydration periods.

At the initial stage of hydration (at 2-day age), according to the results of X-ray phase analysis, the composition of all the studied white cement samples is represented by the following hydration products: ettringite ($d = 0,977; 0,568$ nm), portlandite ($d = 0,263; 0,493; 0,312$ nm) and low-basic calcium hydrosilicates (extensive area of diffraction reflections in the range of double angles from 25 to 37 degrees). The diffractograms also show the phases of alite ($d = 0,304; 0,278; 0,261$ nm), belite ($d = 0,289; 0,278; 0,219$ nm), not reacted with water, and in compositions with the addition of highly dispersed titanium dioxide powder also anatase ($d = 0,353$ nm).

РИСУНОК 1

РЕНТГЕНОГРАММЫ ГИДРАТИРОВАННОГО
ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ
ЩЦБ-Египет в 28-ми суточном возрасте

Figure 1

X-ray patterns of hydrated cement stone
PCW-Egypt at 28 days of age

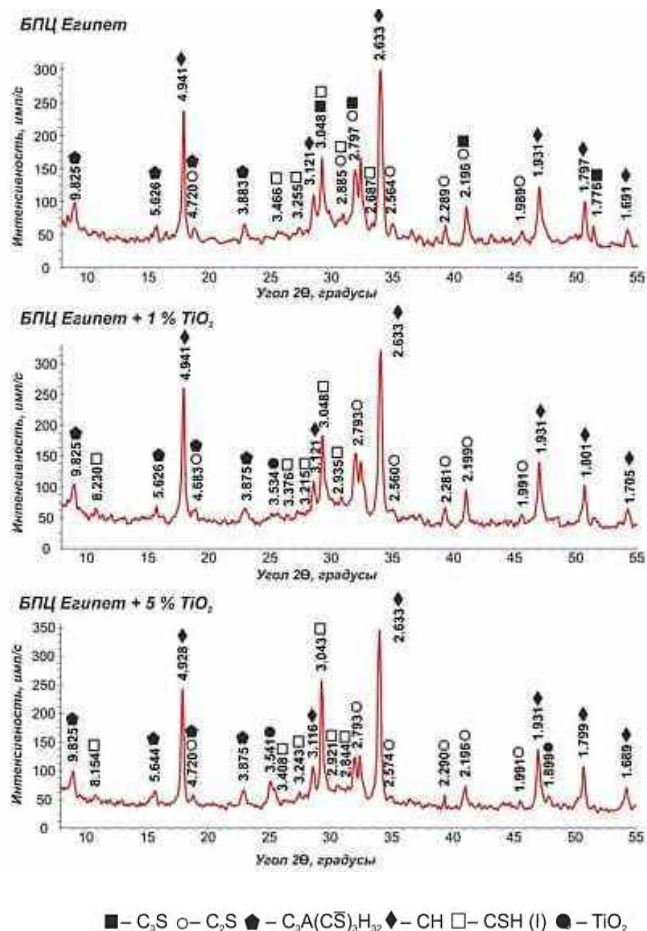
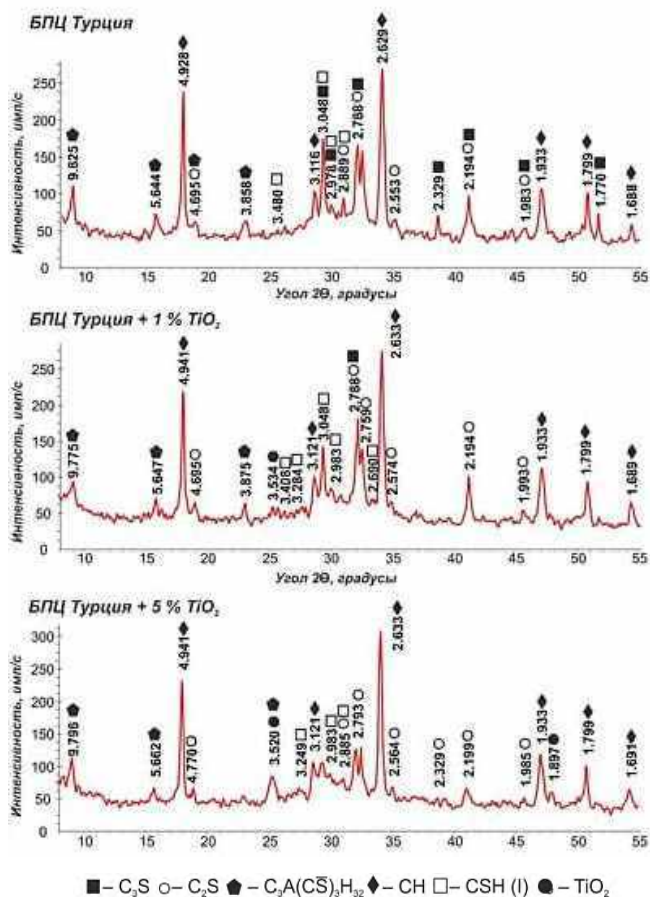


РИСУНОК 2

РЕНТГЕНОГРАММЫ ГИДРАТИРОВАННОГО
ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ
ЩЦБ-Турция в 28-ми суточном возрасте

Figure 2

X-ray patterns of hydrated cement stone
PCW-Turkey at 28 days of age



Присутствие TiO_2 в цементах существенно ускоряет гидратацию силикатов кальция, о чем свидетельствует увеличение интенсивности рефлексов портландита, большая область присутствия соединений с неупорядоченной структурой и большее снижение интенсивности дифракционных отражений клинкерных силикатов кальция (алита и белита), по сравнению с бездобавочными цементами.

К 7-ми суточному возрасту интенсивность рефлексов образованного портландита в бездобавочных цементах достигла аналогичных значений экспериментальных составов в 2-х суточном возрасте. Присутствуют дифракционные отражения низкоосновных гидросиликатов кальция ($d = 0,304$ нм). Количество алита в белых цементах с вводом диоксида титана продолжает сокращаться, что подтверждается снижением интенсивности всех дифракционных отражений, в том числе и характерном для алита рефлексе $0,177$ нм.

В возрасте 28-ми суток в фазовом составе образцов белых цементов с добавкой диоксида титана дифракционные отражения алита отсутствуют (рисунок 1 и 2). Интенсивность рефлексов фазы низкоосновных гидросиликатов кальция возросла в среднем от 150 до 190 имп/с для основного рефлекса $0,304$ нм. Интенсивность отражений белита существенно снизилась и для основного дифракционного рефлекса данной фазы ($d = 0,278$ нм) находится ниже 150 имп/с.

Диоксид титана активно воздействует на силикаты кальция вне зависимости от соотношения между фазами алита и белита. Так, у турецкого цемента, содержащего большее количество белита по сравнению с египетским цементом, снижение интенсивности рефлексов происходит на большую величину в процентном эквиваленте (27,5 % снижение интенсивности у египетского и 33,8 % снижение интенсивности рефлекса у турецкого цемента при вводе 5 % TiO_2).

Количество портландита, присутствующего в составе гидратированных образцов, устанавливали при помощи этил-глицератного метода (таблица 3). Содержание $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в бездобавочном составе египетского цемента изменялось от 10,89 % в 2-х суточном возрасте до 13,9 % в возрасте 28 суток. Наличие диоксида титана существенно увеличивает количество выделяемого портландита в гидратированном цементе: при 1 % TiO_2 содержание портландита изменяется от 12,49 до 14,58 % в 2-х и 7-ми суточном возрасте, соответственно; при 5 % содержании TiO_2 изменение происходит от 12,74 до 15,74 % в те же сроки.

The presence of TiO_2 in cements significantly accelerates the hydration of calcium silicates, as evidenced by an increase in the intensity of portlandite reflections, a larger area of presence of compounds with disordered structure and a greater decrease in the intensity of diffraction reflections of clinker calcium silicates (alite and belite), compared to non-added cements.

By 7 days of age, the intensity of reflections of formed portlandite in additive-free cements reached similar values of experimental co-compounds at 2 days of age. Diffraction reflections of low-base calcium hydrosilicates ($d = 0.304$ nm) are present. The amount of alite in white cements with titanium dioxide input continues to decrease, which is confirmed by a decrease in the intensity of all diffraction reflections, including the 0.177 nm reflex characteristic of alite.

At the age of 28 days in the phase composition of samples of white cements with titanium dioxide addition diffraction reflections of alite are absent (Figures 1 and 2). The intensity of reflections of the phase of low-base calcium hydrosilicates increased on average from 150 to 190 imp/s for the main reflection of 0.304 nm. The intensity of reflections of belite significantly decreased and is below 150 imp/s for the main diffraction reflex of this phase ($d = 0.278$ nm).

Titanium dioxide is active on calcium silicates regardless of the ratio between alite and belite phases. Thus, in Turkish cement containing a greater amount of belite compared to Egyptian cement, the reduction of reflex intensity is greater in percentage equivalent (27.5 % reduction of intensity in Egyptian cement and 33.8 % reduction of reflex intensity in Turkish cement when 5 % TiO_2 is introduced).

The amount of portlandite present in the hydrated samples was determined by ethyl glycerate method (Table 3). The $\text{Ca}(\text{OH})_2$ content in the additive-free composition of Egyptian cement varied from 10.89 % at 2 days of age to 13.9 % at 28 days of age. The presence of titanium dioxide significantly increases the amount of released portlandite in hydrated cement: at 1 % TiO_2 the content of portlandite changes from 12.49 to 14.58 % at 2 and 7 days of age, respectively; at 5 % TiO_2 content the change occurs from 12.74 to 15.74 % at the same time.

ТАБЛИЦА 3 СОДЕРЖАНИЕ ПОРТЛАНДИТА В ЦЕМЕНТНОМ КАМНЕ БЕЛЫХ ЦЕМЕНТОВ
Table 3 Portlandite content in cement stone of white Portland cements

Вид цемента Type of cement	Количество портландита, % Amount of portlandite, %		
	2 сут 2 day	7 сут 7 day	28 сут 28 day
ПЦБ-Египет б/д PCW-Egypt without additives	10,89	13,03	13,9
ПЦБ-Египет + 1% TiO_2 PCW-Egypt + 1% TiO_2	12,49	14,10	14,58
ПЦБ-Египет + 5% TiO_2 PCW-Egypt + 5% TiO_2	12,74	14,67	15,74
ПЦБ- Турция б/д PCW-Turkey without additives	11,19	12,63	13,24
ПЦБ- Турция + 1% TiO_2 PCW-Turkey + 1% TiO_2	12,10	13,04	13,33
ПЦБ- Турция + 5% TiO_2 PCW-Turkey + 5% TiO_2	12,49	14,21	14,58

Содержание $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в бездобавочном составе турецкого цемента изменялось от 11,19 % в 2-х суточном возрасте до 13,24 % в возрасте 28 суток. Добавление 1 % диоксида титана сравнительно увеличивает количество портландита только в начальные сроки твердения. Введение 5 % TiO_2 изменяет содержание $\text{Ca}(\text{OH})_2$ на 1,3 % в 2-х суточном возрасте и на 1,34 % – в 28-ми суточном возрасте.

Степень гидратации в 28-ми суточном возрасте образцов белых портландцементов при введении 5 % диоксида титана больше, чем у контрольного, и для египетского цемента составляет 90 %, а для турецкого цемента – 88 %. Введение 1 % TiO_2 увеличивает степень гидратации на ~2 и 3 %. [20].

Изучение микроструктуры цементного камня, полученного на основе контрольных и экспериментальных составов белых цементов в 28-ми суточном возрасте (рисунок 3), позволило установить, что формируемые в процессе гидратации кристаллы имеют ромбическую, пластинчатую и игольчатую формы. Помимо продуктов реакций взаимодействия клинкерных минералов с водой, состав цементного камня содержит также не вступившие в реакцию кристаллы белита округлой формы, количество которых на рассматриваемых сколах поверхности уменьшается при увеличении содержания диоксида титана как для египетского цемента, так и турецкого. Составление карты распределения элементов показало более равномерное нахождение кристаллогидратов в объеме цементного камня, в особенности алумосодержащих фаз. Размер отдельно взятых продуктов гидратации находится в пределах 10-35 мкм и уменьшается при увеличении концентрации TiO_2 в составе до 8-22 мкм. Введенный в цементы диоксид титана, согласно проведенному энергодисперсионному анализу, присутствует как в виде отдельно взятых агломератов анатаза, так и в незначительном количестве в составе кристаллогидратов, преимущественно гидросиликатов кальция разной основности (количество диоксида титана изменялось от 0,5 до 4,3 % при 1 и 5 % содержании TiO_2).

The $\text{Ca}(\text{OH})_2$ content in the additive-free composition of Turkish cement varied from 11.19 % at 2 days of age to 13.24 % at 28 days of age. The addition of 1 % titanium dioxide comparatively increases the amount of portlandite only in the initial curing time. The introduction of 5 % TiO_2 changes the $\text{Ca}(\text{OH})_2$ content by 1.3 % at 2 days of age and by 1.34 % at 28 days of age.

The degree of hydration at 28 days of age of white Portland cement samples at introduction of 5 % of titanium dioxide is higher than that of the control and for Egyptian cement is 90 %, and for Turkish cement - 88 %. The introduction of 1% TiO_2 increases the degree of hydration by ~2 and 3%. [20].

The study of the microstructure of cement stone, obtained on the basis of control and experimental compositions of white cements at 28 days of age (Figure 3), allowed to establish that the crystals formed in the process of hydration have rhombic, lamellar and needle shapes. In addition to products of reactions of mutual interaction of clinker minerals with water, the composition of cement stone contains also unreacted crystals of belite of rounded shape, the number of which on the considered surface chips decreases with increasing content of titanium dioxide both for Egyptian and Turkish cement. The mapping of element distribution showed a more uniform location of crystalline hydrates in the volume of cement stone, especially the aluminous phases. The size of separately taken hydration products is in the range of 10-35 microns and decreases with increasing TiO_2 concentration in the composition up to 8-22 microns. Titanium dioxide introduced into the elements, according to the energy-dispersion analysis, is present both in the form of separately taken agglomerates of anatase, and in insignificant quantity in the composition of crystalline hydrates, mainly calcium hydrosilicates of different basicity (the amount of titanium dioxide varied from 0.5 to 4.3% at 1 and 5% TiO_2 content).

РИСУНОК 3

МИКРОФОТОГРАФИИ ПОВЕРХНОСТИ СКОЛА ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

в 28-ми суточном возрасте:

- а) ПЦБ-Египет б/д;
- б) ПЦБ-Египет + 1% TiO_2 ;
- в) ПЦБ-Египет + 5% TiO_2 ;
- г) ПЦБ-Турция б/д;
- д) ПЦБ-Турция + 1% TiO_2 ;
- е) ПЦБ-Турция + 5% TiO_2

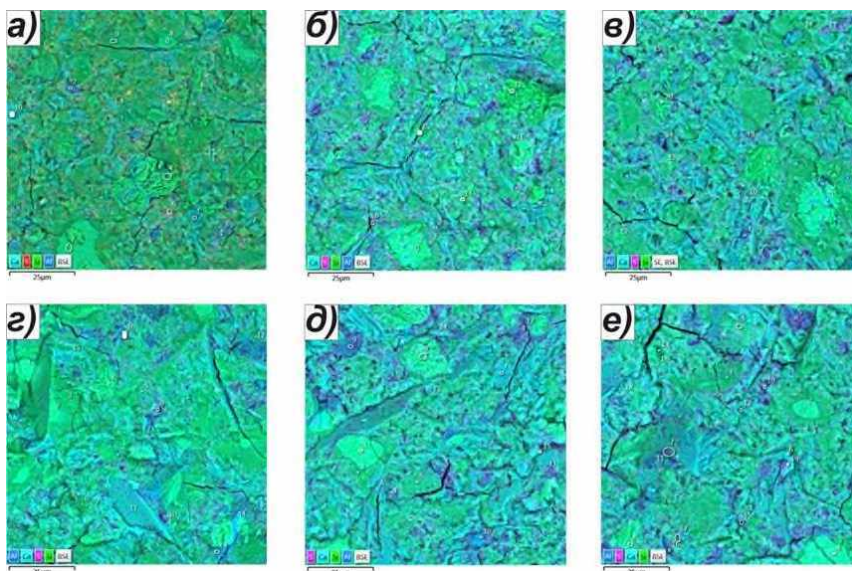


Figure 3

Microphotographs of the surface of a cement stone at 28 days of age

- a) PCW-Egypt without additives
- b) PCW-Egypt + 1% TiO_2
- c) PCW-Egypt + 5% TiO_2
- d) PCW-Turkey without additives
- e) PCW-Turkey + 1% TiO_2
- f) PCW-Turkey + 5% TiO_2

Определение способности белых цементов к самоочищению при введении в их состав AEROXIDE TiO₂ P25 показало, что увеличение количества порошка диоксида титана от 1 до 5 % сопровождается ростом смачиваемости поверхности цементного камня.

Эффект самоочищения обусловлен образованием свободных радикалов кислорода и локальным возникновением участков некомпенсированной энергии под действием УФ-излучения, что способствует окислению органических загрязнений (углеводородов), находящихся на поверхности, с образованием углекислого газа и воды.

Результаты определения изменений краевого угла смачивания цементов после 4 и 26 часовой обработки УФ-излучением представлены в таблице 4. Исходя из полученных данных следует, что после 4 часового воздействия излучением краевой угол смачивания для египетского белого портландцемента, вне зависимости от введенного количества добавки-фотокатализатора, изменяется на величину равную примерно 80 % от максимально возможного изменения краевого угла смачивания, достигаемого после 26 часов обработки УФ-излучением.

Determination of the self-cleaning ability of white cements when AEROXIDE TiO₂ P25 is introduced into their composition showed that the increase in the amount of titanium dioxide powder from 1 to 5 % is accompanied by an increase in the wettability of the cement stone surface.

The self-cleaning effect is due to the formation of free oxygen radicals and local appearance of uncompensated energy areas under UV radiation, which promotes the oxidation of organic contaminants (hydrocarbons) located on the surface, with the formation of carbon dioxide and water.

The results of determining the changes in the wetting angle of the cements after 4 and 26 hours of UV-irradiation treatment are presented in Table 4. Based on the data obtained, it follows that after 4 hours of exposure to radiation the wetting angle of Egyptian white Portland cement, regardless of the amount of added photocatalyst, changes by a value equal to about 80% of the maximum possible change in the wetting angle, achieved after 26 hours of treatment with UV radiation.

ТАБЛИЦА 4 КРАЕВОЙ УГОЛ СМАЧИВАНИЯ БЕЛЫХ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТОВ
Table 4 Contact angle of white Portland cements

Вид цемента Type of cement	Краевой угол смачивания, град. Contact angle, degrees		
	Начальное значение Initial value	После 4 часов обработки УФ-излучением After 4 hours of UV treatment	После 26 часов обработки УФ-излучением After 26 hours of UV treatment
ПЦБ-Египет б/д PCW-Egypt without additives	61,17	58,25	56,28
ПЦБ-Египет + 1% TiO ₂ PCW-Egypt + 1% TiO ₂	61,92	34,57	27,84
ПЦБ-Египет + 5% TiO ₂ PCW-Egypt + 5% TiO ₂	61,42	29,33	20,98
ПЦБ- Турция б/д PCW-Turkey without additives	58,98	59,25	58,02
ПЦБ- Турция + 1% TiO ₂ PCW-Turkey + 1% TiO ₂	58,28	38,69	28,79
ПЦБ- Турция + 5% TiO ₂ PCW-Turkey + 5% TiO ₂	61,88	25,86	16,64

Для белого портландцемента турецкого производства подобной особенности зафиксировано не было: изменение краевого угла смачивания при вводе 1 % AEROXIDE TiO₂ P25 после 4-х часовой обработки составило 67 % от показателя при 26-часовой обработке, а при вводе 5 % TiO₂ – 80 %. Данная особенность может быть связана с минералогическим составом портландцементов, в которых существенно отличается содержание алита, обеспечивающего основной объем образуемого портландита.

Заключение

1. Наличие высокодисперсного порошка диоксида титана в составе гидратируемого белого портландцемента существенно ускоряет процесс формирования гидросиликатов кальция и портландита во все сроки твердения и набора прочности. Об этом свидетельствует как увеличение количества портландита, присутствующего в составе гидратированных образцов, установленного при помощи этил-глицератного метода, так и увеличение

For white Portland cement of Turkish production, no such peculiarity was recorded: the change in the wetting angle at the introduction of 1% AEROXIDE TiO₂ P25 after 4-hour treatment amounted to 67% of the indicator at 26-hour treatment, and at the introduction of 5% TiO₂ – 80%. This feature can be associated with the mineralogical composition of Portland cements, in which the content of alite, which provides the main volume of formed portlandite, is significantly different.

Conclusions

1. The presence of highly dispersed titanium dioxide powder in the composition of hydrated white Portland cement significantly accelerates the formation of calcium hydrosilicate and portlandite in all periods of curing and strength gain. This is evidenced both by the increase in the amount of portlandite present in the hydrated samples, established by the ethyl-glycerate method, and an increase

интенсивности отражений портландита на рентгенограммах гидратированных образцов.

2. Увеличение области вещества с неупорядоченной структурой характерной для гидросиликатов кальция переменного состава, а также снижение дифракционных отражений соответствующих клинкерных минералов свидетельствует об интенсификации процесса гидратации клинкерных минералов. Степень гидратации образцов с вводом порошка диоксида титана достигает 88-90 %, что на 3-5 % больше, чем у контрольных бездобавочных образцов.

3. Исследование микроструктуры цементного камня при вводе в состав вяжущих композиций диоксида титана показало, что распределение кристаллогидратов в экспериментальных составах происходит более равномерно, но максимальный размер сформированных гидратных фаз уменьшается с 10-35 мкм до 8-22 мкм. Введенный диоксид титана присутствует как в виде отдельно взятых агломератов анатаза, так и, в незначительном количестве, в составе кристаллогидратов, преимущественно гидросиликатов кальция разной основности, в количестве от 0,5 до 4,3 %.

4. Определение способности материалов к самоочищению после ввода в состав порошка диоксида титана позволило установить, что изменение статического краевого угла смачивания происходит наиболее активно в течение 4-часовой обработки загрязненной поверхности УФ-излучением. Данный временной интервал обеспечивает 67-80 % изменения краевого угла смачивания от значения, достигаемого при 26-ти часовой обработке поверхности УФ-излучением.

5. Ранее определенные прочностные характеристики и определенные в данном исследовании фотокаталитические способности цементов с вводом высокодисперсного диоксида титана позволило установить, что оптимальным количеством ввода данной добавки-фотокатализатора (AEROXIDE TiO₂ P25) является 1 %. При данном содержании TiO₂ обеспечивается самоочищение поверхности цементного камня и сохранение его прочности.

in the intensity of portlandite reflections on X-ray radiographs of hydrated samples.

2. The increase in the area of matter with disordered structure characteristic of calcium hydrosilicates of variable composition, as well as the decrease in diffraction reflections of the corresponding clinker minerals testifies to the intensification of the process of hydration of clinker minerals. The degree of hydration of samples with the introduction of titanium dioxide powder reaches 88-90 %, which is 3-5 % more than that of control unadded samples.

3 The study of cement stone microstructure at introduction of titanium dioxide into binder compositions showed that the distribution of crystalline hydrates in experimental compositions is more uniform, but the maximum size of formed hydrate phases decreases from 10-35 microns to 8-22 microns. The introduced titanium dioxide is present both in the form of separately taken agglomerates of anatase and, in insignificant amount, in the composition of crystalline hydrates, mainly calcium hydrosilicates of different basicity, in the amount from 0.5 to 4.3 %.

4. determination of the ability of materials to self-cleaning after the introduction of titanium dioxide powder into the composition allowed to establish that the change of static wetting edge angle is most active during 4-hour treatment of the contaminated surface with UV radiation. This time interval provides 67-80 % of the change in the wetting edge angle from the value achieved during 26-hour treatment of the surface with UV radiation.

5. Previously determined strength characteristics and photocatalytic abilities of cements with introduction of highly dispersed titanium dioxide in this study allowed to establish that the optimum amount of introduction of this additive-photocatalyst (AEROXIDE TiO₂ P25) is 1 %. At this TiO₂ content self-cleaning of the cement stone surface and preservation of its strength are ensured.

Литература:

1. Зубехин А.П., Голованова С.П. Теория и технология белого портландцемента // *ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси*. 2009. № 2 (9). С. 56-75.
2. Зубехин А.П., Голованова С.П. Белый портландцемент, его роль в архитектурно-строительном дизайне, производство и применение // *Цемент и его применение*. 2010. № 3. С. 35-37.
3. Одинцов Д.С., Суворов А.С., Естемесов З.А., Барвинов А.В. Химико-технические свойства белого портландцемента // *Вестник Казахстано-Британского технического университета*. 2022. Т. 19. №3. С. 33-44.
4. Зубехин А.П., Голованова С.П., Кирсанов П.В. Супербелый портландцемент. Фазовый состав, технология // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2004. №1. С. 41-44.
5. Грачян А.Н., Гайджуrow П.П., Зубехин А.П., Ротыч Н.В. Технология белого портландцемента. М.: Стройиздат, 1970. 73 с.
6. Мурзабекова Э. Т. Фотокаталитические свойства наноразмерного оксида цинка, полученного с использованием суммарной энергии импульсной плазмы и энергии межфазной поверхности // *Молодой ученый*. 2016. № 20 (124). С. 13-19.

References:

1. Zubekhin A.P., Golovanova S.P. Theory and technology of white Portland cement // *ALITinform: Cement. Concrete. Dry mixes*. – 2009. № 2 (9). – С. 56-75. (in Russian).
2. Zubekhin A.P., Golovanova S.P. White Portland cement, its role in architectural and construction design, production and application // *Cement and its application*. – 2010. № 3. – С. 35-37. (in Russian).
3. Odintsov D.S., Suvorov A.S., Estemesov Z.A., Barvinov A.V. Chemical and technical properties of white Portland cement // *Vestnik of Kazakhstan-British Technical University*. – 2022. – Т. 19. №3. – С. 33-44. (in Russian).
4. Zubekhin A.P., Golovanova S.P., Kirsanov P.V. Superwhite Portland cement. Phase composition, technology // *Izvestiya vysshee obucheniya. North-Caucasian region. Technical Sciences*. – 2004. №1. – С. 41-44. (in Russian).
5. Grachyan A.N., Gaidzhurov P.P., Zubekhin A.P., Rotych N.V. *Technology of white Portland cement*. Moscow: Stroyizdat, – 1970. 73 с. (in Russian).
6. Murzabekova E. T. Photocatalytic properties of nanosized zinc oxide obtained using the total energy of pulsed plasma and interfacial surface energy // *Young Scientist*. – 2016. № 20 (124). – С. 13-19. (in Russian).

7. Лукутцова Н.П., Ефремочкин Р.А., Борсук О.И., Головин С.Н. Фотокаталитически активный самоочищающийся мелкозернистый бетон // *Строительные материалы*. 2020. №1-2. С. 8-16. <https://doi:10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-8-15>.
8. Kumari V., Yadav S., Jindal J., Sharma S., Kumar K., Kumar N. Synthesis and characterization of heterogeneous ZnO/CuO hierarchical nanostructures for photocatalytic degradation of organic pollutant // *Advanced Powder Technology*. 2020. Vol. 31 (7). Pp. 2658-2668. <https://doi:10.1016/j.appt.2020.04.033>
9. Fernández-García M., Martínez-Arias A., Hanson J. C., Rodríguez J. A. Nanostructured Oxides in Chemistry: Characterization and Properties. // *Chemical Reviews*. 2004. Vol. 104 (9). Pp. 4063-4104. <https://doi:10.1021/cr030032f>.
10. Samchenko S.V., Kozlova I.V., Korshunov A.V., Zemskova O.V., Dudareva M.O. Synthesis and Evaluation of Properties of an Additive Based on Bismuth Titanates for Cement Systems. *Materials* 2023, 16(18), 6262; <https://doi.org/10.3390/ma16186262> <https://www.mdpi.com/1996-1944/16/18/6262>
11. Самченко С.В., Козлова И.В., Коршунов А.В., Земскова О.В., Дударева М.О., Агафонова Н.З. Исследование физико-механических и фотокаталитических свойств цементных композитов, модифицированных промышленным диоксидом титана // *Техника и технология силикатов*. – 2023. – Т. 30, № 2. – С. 152-161.
12. Тюкавкина В.В., Щелокова Е.А., Поживина К.А., Касиков А.Г. Нанодобавки на основе диоксида титана и диоксида кремния для самоочищающихся бетонов // *Строительные материалы*. 2021. № 5. С. 47–53. <https://doi:10.31659/0585-430X-2021-791-5-47-53>
13. Антоненко М.В., Огурцова Ю.Н., Строчкова В.В., Губарева Е.Н. Фотокаталитически активные самоочищающиеся материалы на основе цемента. Составы, свойства, применение // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2020. № 3. С. 16–25. <https://doi:10.34031/2071-7318-2020-5-3-16-25>.
14. Jayapalan A.R., Lee B.Y., Kurtis K.E. Effect of Nano-sized Titanium Dioxide on Early Age Hydration of Portland Cement // *Nanotechnology in construction*. 2009. Vol. 3. Pp. 267–273. https://doi:10.1007/978-3-642-00980-8_35.
15. Хела Р., Боднарова Л. Исследование возможности тестирования эффективности фотокатализа TiO₂ в бетоне // *Строительные материалы*. 2015. № 2. С. 77–81.
16. Aissa A.H., Puzenat E., Plassais A., Herrmann J.M., Haehnel C., Guillard C. Characterization and photocatalytic performance in air of cementitious materials containing TiO₂. Case study of formaldehyde removal // *Applied Catalysis B: Environment*. 2011. Vol. 107 (1–2). Pp. 1–8. <https://doi:10.1016/j.apcatb.2011.06.012>.
17. Pal A., Jana T.K., Chatterjee K. Silica supported TiO₂ nanostructures for highly efficient photocatalytic application under visible light irradiation // *Materials Research Bulletin*. 2016. Vol. 76. Pp. 353-357. <https://doi:10.1016/j.materresbull.2015.12.040>.
18. Лукутцова Н.П., Пыкин А.А., Постникова О.А., Головин С.Н., Боровик Е.Г. Структура цементного камня с диспергированным диоксидом титана в суточном возрасте // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2016. № 11. С.13-17. doi:10.12737/22432.
19. Тюкавкина В.В., Цырятиева А.В. Структура цементного камня, модифицированного нанодисперсной титаносодержащей добавкой // *Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН*. 2019. № 16. С. 597–601. <https://doi:10.31241/FNS.2019.16.122>.
7. Lukutsova N.P., Efremochkin R.A., Borsuk O.I., Golovin S.N. Photocatalytically active self-cleaning fine-grained concrete // *Stroitelnye materialy*. – 2020. №1-2. – С. 8-16. <https://doi:10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-8-15> . (in Russian).
8. Kumari V., Yadav S., Jindal J., Sharma S., Kumar K., Kumar N. Synthesis and characterization of heterogeneous ZnO/CuO hierarchical nanostructures for photocatalytic degradation of organic pollutant // *Advanced Powder Technology*. 2020. Vol. 31 (7). Pp. 2658-2668. <https://doi:10.1016/j.appt.2020.04.033>
9. Fernández-García M., Martínez-Arias A., Hanson J. C., Rodríguez J. A. Nanostructured Oxides in Chemistry: Characterization and Properties. // *Chemical Reviews*. 2004. Vol. 104 (9). Pp. 4063-4104. <https://doi:10.1021/cr030032f>.
10. Samchenko S.V., Kozlova I.V., Korshunov A.V., Zemskova O.V., Dudareva M.O. Synthesis and Evaluation of Properties of an Additive Based on Bismuth Titanates for Cement Systems. *Materials* 2023, 16(18), 6262; <https://doi.org/10.3390/ma16186262> <https://www.mdpi.com/1996-1944/16/18/6262>
11. Samchenko S.V., Kozlova I.V., Korshunov A.V., Zemskova O.V., Dudareva M.O., Agafonova N.Z. Investigation of physico-mechanical and photocatalytic properties of cement composites modified with industrial titanium dioxide // *Technique and technology of silicates*. – 2023. Vol. – 30, No2. – Pp. 152 – 161.
12. Tyukavkina V.V., Shchelokova E.A., Pozhivina K.A., Kasikov A.G. Nanoadditives based on titanium dioxide and sili-con dioxide for self-cleaning concrete // *Stroitelnye materialy*. – 2021. № 5. – С. 47-53. <https://doi:10.31659/0585-430X-2021-791-5-47-53> . (in Russian).
13. Antonenko M.V., Ogurtsova Y.N., Strokova V.V., Gubareva E.N. Photocatalytically active self-cleaning materials based on cement. Compositions, properties, application // *Vestnik BSTU named after V.G. Shukhov BSTU*. – 2020. № 3. – С. 16-25. <https://doi:10.34031/2071-7318-2020-5-3-16-25> . (in Russian).
14. Jayapalan A.R., Lee B.Y., Kurtis K.E. Effect of Nano-sized Titanium Dioxide on Early Age Hydration of Portland Cement // *Nanotechnology in construction*. 2009. Vol. 3. Pp. 267–273. https://doi:10.1007/978-3-642-00980-8_35.
15. Hela R., Bodnarova L. Investigation of the possibility of testing the efficiency of TiO₂ photocatalysis in concrete // *Stroitelnye Materialy*. – 2015. № 2. – С. 77-81. (in Russian).
16. Aissa A.H., Puzenat E., Plassais A., Herrmann J.M., Haehnel C., Guillard C. Characterization and photocatalytic performance in air of cementitious materials containing TiO₂. Case study of formaldehyde removal // *Applied Catalysis B: Environment*. 2011. Vol. 107 (1–2). Pp. 1–8. <https://doi:10.1016/j.apcatb.2011.06.012>.
17. Pal A., Jana T.K., Chatterjee K. Silica supported TiO₂ nanostructures for highly efficient photocatalytic application under visible light irradiation // *Materials Research Bulletin*. 2016. Vol. 76. Pp. 353-357. <https://doi:10.1016/j.materresbull.2015.12.040>.
18. Lukutsova N.P., Pykin A.A., Postnikova O.A., Golovin S.N., Borovik E.G. Structure of cement stone with dispersed titanium dioxide in the diurnal age // *Vestnik BSTU named after V.G. Shukhov*. – 2016. № 11. – С.13-17. doi:10.12737/22432.
19. Tyukavkina V.V., Tsyryatieva A.V. Structure of cement stone modified with nanodispersed titanium-containing additive // *Proceedings of the Fersman Scientific Session of the GI KSC RAS*. – 2019. № 16. – С. 597-601. <https://doi:10.31241/FNS.2019.16.122> . (in Russian).

20. Гребенюк А.А., Ерошенко Т.С., Борисов И.Н., Вагин С.А. Влияние высокодисперсного порошка диоксида титана на свойства белого портландцемента // Техника и технология силикатов. – 2023. – Т. 30, № 3. – С. 252-263.

20. Grebeniuk A.A., Eroshenko T.S., Borisov I.N., Vagin S.A. The influence of highly dispersed of titanium dioxide powder on the properties of white Portland cement // *Technique and technology of silicates*. – 2023. Vol. – 30, No3. – Pp. 252-263.

Гребенюк Александр Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии цемента и композиционных материалов. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

E-mail: alexander.grebeniuk@mail.ru (автор для связи)

Ерошенко Татьяна Сергеевна – магистр кафедры технологии цемента и композиционных материалов. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

E-mail: tattianna2016@yandex.ru

Борисов Иван Николаевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии цемента и композиционных материалов. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

E-mail: borisov@intbel.ru

Вагин Сергей Алексеевич – технический директор, Общество с ограниченной ответственностью «Техпром-Инжиниринг».

E-mail: s.vagin@tpengin.com

Вклад авторов: *Борисов И.Н. и Гребенюк А.А.* - идея, научное руководство, научное редактирование статьи; *Ерошенко Т.С.* – разработка методик, обработка материала, написание статьи; *Вагин С.А.* – обработка материала, написание статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Grebenyuk Alexander Alexandrovich - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Cement Technology and Composite Materials. V.G. Shukhov Belgorod State Technological University.

E-mail: alexander.grebeniuk@mail.ru (author for contact)

Eroshenko Tatiana Sergeevna - Master's student of the Department of Cement and Composite Materials Technology. V.G. Shukhov Belgorod State Technological University.

E-mail: tattianna2016@yandex.ru

Borisov Ivan Nikolaevich - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Cement and Composite Materials Technology. V.G. Shukhov Belgorod State Technological University. *E-mail:* borisov@intbel.ru

Vagin Sergey Alekseevich - Technical Director, Limited Liability Company "Techprom-Engineering".

E-mail: s.vagin@tpengin.com

Contribution of the author: *Borisov I.N. and Grebenyuk A.A.* - idea, scientific guidance, scientific editing of the article; *Eroshenko T.S.* - development of methods, processing of material, writing of the article; *Vagin S.A.* - processing of material, writing of the article.

The authors declare that there is no conflict of interest.