

Academia. Архитектура и строительство, № 4, стр. 138–144.

Academia. Architecture and Construction, no. 4, pp. 138–144.

Исследования и теория

Научная статья

УДК 691.542

DOI: 10.22337/2077-9038-2023-4-138-144

Фазовый состав продуктов гидратации портландцемента, механоактивированного в аппарате вихревого слоя с добавками различной природы

Ибрагимов Руслан Абдирашитович (Казань). Кандидат технических наук, доцент. Казанский государственный архитектурно-строительный университет (Россия, 420043, Казань, ул. Зелёная, 1. КГАСУ). Эл. почта: rusmag007@yandex.ru

Королёв Евгений Валерьевич (Санкт-Петербург). Доктор технических наук, профессор. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (Россия, 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4. СПбГАСУ). Эл. почта: korolev@nocnt.ru

Аннотация. В статье представлены результаты исследований влияния природы суперпластификаторов на фазовый состав цементного камня, твердевшего 1 и 28 сут. в нормально-влажностных условиях. Установлено, что активация портландцемента в аппарате вихревого слоя снижает содержание непрогидратированных минералов портландцементного клинкера. Количество продуктов гидратации цементного камня, твердевшего в течение двух суток, полученных традиционным образом, убывает при введении добавок: C-3 → SP10 → MF. Совместный помол исследуемых добавок с портландцементом в аппарате вихревого слоя способствует повышению количества продуктов гидратации на 4–35 % в зависимости от вида добавки, и по эффективности их увеличения располагается в ряду: C-3 → SP10 → MF. На первые сутки твердения прочность цементного камня в значительной степени зависит от характеристик кристаллов в цементном камне, при этом прочность цементного камня увеличивается при уменьшении величины приведённого размера блока-мозаики всех идентифицированных фаз цементного камня.

Ключевые слова: активация, гидратация, фазовый состав, цементный камень

Для цитирования. Ибрагимов Р.А., Королёв Е.В. Фазовый состав продуктов гидратации портландцемента, механоактивированного в аппарате вихревого слоя с добавками различной природы // Academia. Архитектура и строительство. – 2023. – № 4. – С. 138–144. – DOI: 10.22337/2077-9038-2023-4-138-144.

Phase Composition of Hydration Products of Portland Cement Mechanically Activated in a Vortex Layer Apparatus with Additives of Various Nature

Ibragimov Ruslan A. (Kazan). Candidate of Sciences in Technology, Docent. Kazan State University of Architecture and Civil Engineering (1, Zelenaya St, Kazan, Tatarstan, 420043, Russia. KSUAE). E-mail: rusmag007@yandex.ru

Korolev Evgeny V. (St. Petersburg). Doctor of Sciences in Technology, Professor. St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (4, 2 Krasnoarmeiskaya St, Saint Petersburg, 190005, Russia. SPbGASU). E-mail: korolev@nocnt.ru

Abstract. The article presents the results of studies of the influence of the nature of superplasticizers on the phase composition of cement stone hardened for 1 and 28 days under normal humidity conditions. It has been established that the activation of Portland cement in the apparatus of the vortex layer reduces the content of non-hydrated minerals of Portland cement clinker. The amount of hydration products of cement stone hardened within 1 day, obtained in the traditional way, decreases with the introduction of additives: C-3 → SP10 → MF. The joint grinding of the studied additives with Portland cement in the vortex

© Ибрагимов Р.А., Королёв Е.В., 2023.

layer apparatus contributes to an increase in the amount of hydration products by 4–35%, depending on the type of additive, and in terms of the effectiveness of their increase, it is located in the series: C-3 → SP10 → MF. On the 1st day of hardening, the strength of the cement stone largely depends on the characteristics of the crystals in the cement stone, while the strength of the cement stone increases with a decrease in the reduced size of the mosaic block of all identified phases of the cement stone.

Keywords: activation, hydration, phase composition, cement stone

For citation. Ibragimov R.A., Korokey E.V. Phase Composition of Hydration Products of Portland Cement Mechanically Activated in A Vortex Layer Apparatus with Additives of Various Nature. In: *Academia. Architecture and Construction*, 2023, no. 4, pp. 138–144, doi: 10.22337/2077-9038-2023-4-138-144.

Повышение эксплуатационных свойств строительных материалов – актуальная задача современного строительства [1]. Одним из способов её решения является механоактивация вяжущего [2]. Долговечность цементного камня при прочих равных условиях зависит от состава исходных компонентов, количества и качества продуктов гидратации портландцемента. Эффективные способы исследования фазового состава гидратных новообразований: рентгенофазовый анализ (РФА), дифференциально-термический анализ (ДТА), инфракрасная спектроскопия (ИКС), ядерный магнитный резонанс (ЯМР), электронная микроскопия и др. Методами РФА и термогравиметрическим анализом (ТГА) в работе [3] установлено, что гидратация C_3S (алита) в периоде от 5 мин до нескольких часов гидратации в основном ограничена зарождением и ростом гидратов (CSH, CH и этtringита). В тоже время, чем выше концентрация ионов Ca^{2+} , тем значительнее тепловыделение при гидратации [4]. Используя данные РФА, установлено, что сульфат-ионы ускоряют процесс растворения твёрдофазного кальция в гидратных новообразованиях портландцемента в первую очередь за счёт химической реакции и диффузии гидроксид-ионов [5]. В портландцементе, по данным РФА, происходит образование полиморфа в фазе C_3S и орторомбического полиморфа в фазе C_3A из-за присутствия второстепенных оксидов, таких как MgO , Na_2O [6]. Дифрактограммы, полученные через 1 мин гидратации, показали, что иелимит и гипс в исследуемом портландцементе быстро реагировали с образованием Aft-фазы, что говорит об интенсивной гидратации [7–9]. Также с помощью метода РФА установлено, что добавление шлака в портландцемент замедляет фазовый переход в цементном тесте под воздействием сульфатов [10].

Цель описанной в статье работы – определить фазовый состав продуктов гидратации цементного камня, полученного механоактивацией портландцемента с добавками различной природы.

Для исследований использовали портландцемент ЦЕМ I 42,5 Б/ПЦ 500-ДО-Н Новотроицкого цементного завода, соответствующий требованиям ГОСТ 31108-2020¹ (далее – ПЦ).

Указанный портландцемент имеет следующий минералогический состав: C_3S – 64...65 %, C_2S – 11...13 %, C_3A – 5...6 %, C_4AF – 14...15 %. Обработку портландцемента производили в аппарате вихревого слоя (АВС) модель 297, производитель ООО «Регионметтранс». В работах [11; 12] приводятся данные по основным конструктивным элементам АВС и режимам его работы. Продолжительность обработки портландцемента в АВС составила пять минут. Для исследований образцов методом рентгенофазового анализа (РФА) изготавливались кубы размером 2×2×2 см из цементного теста, которые твердели в течении 28 суток в нормально-влажностных условиях.

В качестве пластификатора применяли следующие суперпластификаторы (СП):

СП С-3 – химическая добавка, продукт конденсации нафталинсульфокислоты и формальдегида, представляет собой водорастворимый порошок, выпускается компанией «ПОЛИПЛАСТ»;

СП Remicrete-SP10 (FM) – химическая добавка на основе полиэфиркарбоксилата, представляет собой жидкость плотностью 1,1 г/см³, выпускается компанией «SCHOMBURG», далее по тексту – SP10;

СП Melflux 2651 F – химическая добавка на основе полиэфиркарбоксилата (полимерная цепь образована α , β -ненасыщенными карбоновыми кислотами), порошок насыпной плотностью 0,4–0,6 г/см³, выпускается концерном «BASF», далее по тексту – MF.

Рентгенограммы снимались на автоматическом рентгеновском дифрактометре D2 Phase (производства Bruker AXS GmbH). Обработку полученных дифракционных спектров проводили с помощью программы DIFFRAC.SUITE. Идентификацию фаз проводили с использованием базы дифракционных данных ICDD PDF-2 Release 2012 с помощью программы DIFFRAC.EVA-v3.1. Качественный расчёт проведён по методу Рейтвельда с использованием программы DIFFRAC.TOPAS-v4.2. Методом Ритвельда оценивается вклад интенсивностей отдельных решёток минералов в интегральную интенсивность нелинейным методом наименьших квадратов разности интегральных и экспериментальных интенсивностей рентгеновского излучения в зависимости от вариации профильных, структурных параметров решёток фаз [13]. Нумерация и расшифровка исследуемых составов приведена в таблице 1.

¹ ГОСТ 31108-2020. Межгосударственный стандарт «Цементы общестроительные. Технические условия» (<https://docs.cntd.ru/document/1200174658>).

Таблица 1. Нумерация и расшифровка составов

№№ состава	Наименование
1	Состав, полученный традиционным способом
2	Состав, полученный активацией портландцемента в АВС
3	Состав, полученный активацией портландцемента совместно с добавкой С-3 в АВС
4	Состав, полученный активацией портландцемента совместно с добавкой SP10 в АВС
5	Состав, полученный традиционным способом, модифицированный добавкой С-3
6	Состав, полученный активацией портландцемента совместно с добавкой MF в АВС
7	Состав, полученный традиционным способом, модифицированный добавкой MF
8	Состав, полученный традиционным способом, модифицированный добавкой SP10

Получены рентгенограммы образцов цементного камня, снятые после вторых и 29-х суток нормального твердения. Анализ количественного расчёта фаз цементного камня, твердевшего в течении 1 и 28 суток в нормальных условиях, представлен на рисунке 1.

Результаты анализа рентгенограмм цементного камня при пересчёте на 100-процентное содержание кристаллической фазы представлены на рисунке 1. Также по данным РФА цементного камня были определены некоторые интегральные параметры кристаллов, а именно: размер области когерентного рассеивания L_d и плотность дислокаций ρ_d . Расчёт этих параметров проведён по формулам, представленным в [14]:

– размер областей когерентного рассеивания (блоков-мозаики):

$$L_d = \lambda \cdot 180^\circ / (\pi \vartheta \cos \theta) \quad (1)$$

где λ – длина волны излучения медного анода, равная 1,537 Å; ϑ – полуширина пика, рад; θ – брэгговский угол падения и отражения рентгеновского луча;

– плотность дислокаций:

$$\rho = \frac{3}{L_d^2} \quad (2)$$

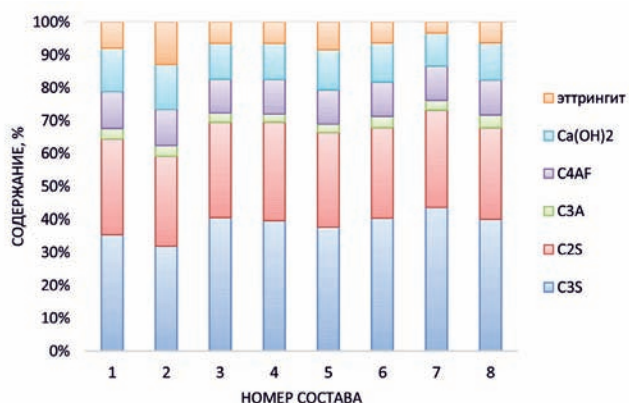
Результаты вычисления представлены в таблице 2.

Из анализа полученных данных следует, что суперпластификаторы на первые сутки твердения уменьшают содержание минералов цементного клинкера. Причём величина этого эффекта зависит от вида пластификатора. Для неактивированного портландцемента максимальное снижение содержания минералов цементного клинкера характерно для пластификатора MF (-3,3%), а минимальное – для С-3 (-1,0%). Механоактивация портландцемента нивелирует влияние пластификатора: для всех исследованных пластификаторов снижение количества минералов цементного клинкера составляет 2,2%.

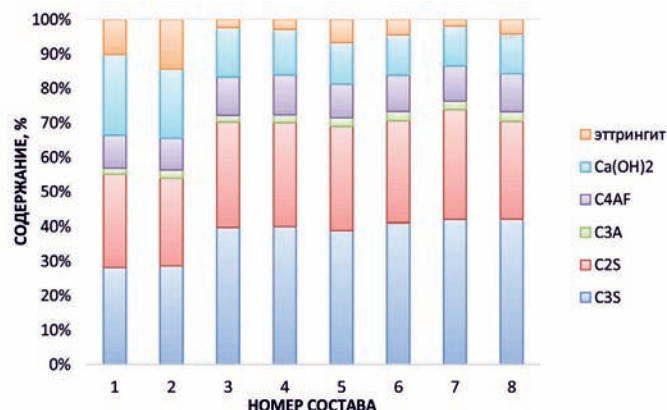
После 28 суток твердения эффект механоактивации нивелируется: для неактивированного и механоактивированного портландцемента наблюдается примерно одинаковое снижение содержания минералов цементного клинкера (-12,2%). При этом суммарное снижение количества минералов цементного клинкера характерно для механоактивированного портландцемента с пластификатором С-3 (-9,6%).

Указанные характерные особенности механоактивации и наличие пластификаторов закономерно влияют на количество идентифицированных с применением РФА продуктов гидратации портландцемента. Так, на первые сутки твердения относительное содержание продуктов гидратации портландцемента в цементном камне, полученном на механоактивированном портландцементе, на 50,3% больше по сравнению с цементным камнем из неактивированного портландцемента. На 28 суток указанное соотношение сокращается до 4,3%.

Изменение в структурообразовании цементного камня оказывает закономерное влияние на его прочность (табл. 3).



а)



б)

Рис. 1. Содержание фаз цементного камня после твердения: а) 1 сутки; б) 28 суток. Графики авторов статьи

Оценку влияния внутренних параметров кристаллов на прочность цементного можно провести по интегральному показателю, имеющему следующий вид:

$$I_L = \sum_i^n L_{d,i} C_i \quad (3)$$

где C_i и $L_{d,i}$ – количество (см. рис. 1) и размер блока-мозаики (см. табл. 2) для каждой фазы цементного камня; n – количество идентифицированных фаз цементного камня.

Сопоставление данных по прочности цементного камня с указанным интегральным показателем демонстрирует,

Таблица 2. Размер блок-мозаики и плотность дислокаций

Наименование / обозначение фазы		Размер кристаллитов, нм / № состава							
		1	2	3	4	5	6	7	8
после одних суток твердения									
C ₃ S		133	110	124	117	116	101	120	112
C ₂ S		41	37	39	37	44	39	43	43
C ₃ A		34	28	30	39	37	36	32	28
C ₄ AF		66	62	66	65	63	61	63	68
Periclase		86	54	71	65	95	53	83	73
Portlandite		61	73	35	37	53	25	41	45
Ettringite		48	44	44	49	43	55	49	47
Плотность дислокаций, М-2·10 ¹⁴	C ₃ S	1,7	2,5	2,0	2,2	2,2	2,9	2,1	2,4
	C ₂ S	17,8	21,9	19,3	21,4	15,6	20,0	16,1	16,1
	C ₃ A	25,9	38,3	33,8	19,6	21,8	23,7	28,9	38,3
	C ₄ AF	6,9	7,8	6,9	7,1	7,5	8,2	7,6	6,5
	Periclase	4,1	10,3	6,0	7,0	3,3	10,7	4,3	5,6
	Portlandite	8,1	5,7	24,6	21,7	10,7	49,2	18,1	15,1
	Ettringite	13,0	15,5	15,4	12,3	16,0	10,1	12,6	13,6
после 28 суток твердения									
C ₃ S		136	111	129	121	118	115	125	114
C ₂ S		48	47	49	46	47	41	45	48
C ₃ A		36	29	38	43	34	37	37	40
C ₄ AF		74	68	68	68	74	62	66	69
Periclase		91	79	92	87	113	64	86	77
Portlandite		46	45	32	36	51	24	39	39
Ettringite		124	71	72	74	51	93	54	49
Плотность дислокаций, М-2·10 ¹⁴	C ₃ S	1,6	2,4	1,8	2,0	2,3	2,3	1,9	2,3
	C ₂ S	13	13,6	12,7	14,3	17,9	17,9	14,9	12,8
	C ₃ A	23,1	35,7	20,8	16,3	22,0	22,0	21,9	18,8
	C ₄ AF	5,5	6,5	6,5	6,5	7,7	7,7	6,9	6,3
	Periclase	3,6	4,8	3,6	4,0	7,2	7,2	4,1	5,1
	Portlandite	14,2	14,8	29,3	23,5	54,3	54,3	19,8	20,1
	Ettringite	1,9	5,9	5,7	5,5	3,4	3,4	10,4	12,5

Таблица 3. Прочность при сжатии цементного камня исследуемых составов

Свойство цементного камня	№№ состава							
	1	2	3	4	5	6	7	8
R _{сж} (1 сут), МПа	12,1	19,9	32,6	42,2	19,2	48,8	15,1	22,2
R _{сж} (28 сут), МПа	42,5	54,8	64,8	62,1	49,7	72,8	61,2	55,8

что величина коэффициента корреляции на первые сутки твердения составляет: $r = -0,79$, а на 28 суток: $r = 0,28$. Полученные результаты демонстрируют весьма важный результат. На первые сутки твердения прочность цементного камня в значительной степени зависит от характеристик кристаллов, которые присутствуют в цементном камне. Причём прочность цементного камня увеличивается при уменьшении величины интегрального показателя, который является приведённым размером блока-мозаики всех идентифицированных фаз цементного камня. Эта зависимость является своеобразным неполным аналогом эмпирической зависимости Петча–Холла, выявленной для металлов.

Отсутствие корреляционной связи между I_L и прочностью цементного камня указывает на преобладающее влияние дополнительного фактора, не связанного с внутренними характеристиками кристаллов. Целесообразно предположить, что для цементного камня после длительного периода структурообразования доминирующее влияние оказывают объёмные дефекты как строения цементного камня, так и кристаллов. Установление зависимости нового интегрального показателя, содержащего I_L , обеспечивающего сильную корреляционную связь, является предметом дополнительного исследования.

* * *

На основе проведённых исследований установлено, что активация портландцемента в АВС снижает содержание негидратированных минералов портландцементного клинкера. Исследуемые суперпластификаторы на первые сутки твердения уменьшают содержание минералов цементного клинкера. Для неактивированного портландцемента максимальное снижение содержания минералов цементного клинкера характерно для пластификатора MF (–3,3 %), а минимальное – для С-3 (–1,0%). После 28 суток твердения эффект механоактивации нивелируется: для неактивированного и механоактивированного портландцемента наблюдается примерно одинаковое снижение содержания минералов цементного клинкера. На первые сутки твердения относительное содержание продуктов гидратации портландцемента в цементном камне, полученном на механоактивированном портландцементе, на 50,3 % больше по сравнению с цементным камнем из неактивированного портландцемента. На 28 суток указанная соотношение сокращается до 4,3 %.

На первые сутки твердения прочность цементного камня в значительной степени зависит от характеристик кристаллов, которые присутствуют в цементном камне. Причём прочность цементного камня увеличивается при уменьшении величины интегрального показателя, который является приведённым размером блока-мозаики всех идентифицированных фаз цементного камня.

Список источников

1. Рахимов, Р.З. Топливо-энергетический комплекс, экология и минеральные вяжущие вещества / Р.З. Рахимов. – DOI: 10.52409/20731523_2022_3_67. – Текст : непосредственный // Известия КГАСУ. – 2022. – № 3 (61). – С. 67–74.
2. Ибрагимов, Р.А. Прочность композитов на основе модифицированного портландцемента, активированного в аппарате вихревого слоя / Ибрагимов Р.А., Королёв Е.В. – DOI: 10.33622/0869-7019.2021.01.35-41. – Текст : непосредственный // Промышленное и гражданское строительство. – 2021. – №1. – С. 35–41.
3. Effect of Alkali and Sulfate on Early Hydration of Portland Cements at High Water to Cement Ratio / M. Zajac, M. Wieczorek, B. Lothenbach, F. Bullerjahn. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128283. – Текст : электронный // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 345. – P. 128283. URL: https://www.researchgate.net/publication/361794370_Effect_of_alkali_and_sulfate_on_early_hydration_of_Portland_cements_at_high_water_to_cement_ratio (дата обращения 16.05.2023). (In Engl.)
4. Yafeng, Rui. CO₂-Fixing Steel Slag on Hydration Characteristics of Cement-Based Materials / Yafeng Rui, Chunxiang Qian. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129193. – Текст : электронный // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 354. – P. 129193. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061822028495> (дата обращения 16.05.2023).
5. Calcium Leaching from Cement Hydrates Exposed to Sodium Sulfate Solutions / Dujian Zou, Ming Zhang, Shanshan Qin, Tiejun Liu. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128975. – Текст : электронный // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 351. – P. 128975. – URL: https://www.researchgate.net/publication/363135613_Calcium_leaching_from_cement_hydrates_exposed_to_sodium_sulfate_solutions (дата обращения 16.05.2023).
6. Recycling of Dredged Sediment as a raw Material for the Manufacture of Portland Cement – Numerical Modeling of the Hydration of Synthesized Cement Using the CEMHYD3D Code / Duc Chinh Chu, Joelle Kleib, Mouhamadou Amar, Mahfoud Benzerzour, Nor-Edine Abriak. – DOI: 10.1016/j.job.2021.103871. – Текст : электронный // Journal of Building Engineering. – 2022. – Vol. 48. P. 103871. – URL: https://www.researchgate.net/publication/356968278_Recycling_of_dredged_sediment_as_a_raw_material_for_the_manufacture_of_Portland_cement_-_Numerical_modeling_of_the_hydration_of_synthesized_cement_using_the_CEMHYD3D_code (дата обращения 16.05.2023).
7. Belite-Calcium Sulphoaluminate Cement Prepared by EMR and BS: Hydration Characteristics and Microstructure Evolution Behavior / Weilong He, Rui Li, Dengpan Nie [et al.] / – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127415. – Текст : электронный // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 333. – P. 127415. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/>

abs/pii/S0950061822010923 (дата обращения 16.05.2023).

8. Preparation of Nano-Kaolin by Wet-Grinding Process and its Application as Accelerator in Portland Cement / Yifan Wang, Hongbo Tan, Xianyu Gu [et al.]. – DOI: 10.1016/j.job.2021.103401. – Текст : электронный // Journal of Building Engineering. – 2021. – Vol. 44. – P. 103401. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710221012596> (дата обращения 16.05.2023).

9. Preparation of Nano Cement Particles by Wet-Grinding and its Effect on Hydration of Cementitious System Maogao Li, Hongbo Tan, Xingyang He, Shouwei Jian [et al.]. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125051. – Текст : электронный // Construction and Building Materials. – 2021. – Vol. 307. – P. 125051. – URL: https://www.researchgate.net/publication/355351406_Preparation_of_nano_cement_particles_by_wet-grinding_and_its_effect_on_hydration_of_cementitious_system (дата обращения 16.05.2023).

10. Effect of Sulfate Attack on the Composition and Micro-Mechanical Properties of C-A-S-H Gel in Cement-Slag Paste: A Combined Study of Nanoindentation and SEM-EDS / Jun Yang, Qingjun Ding, Gaozhan Zhang, Dongshuai Hou [и др.]. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128275. – Текст : электронный // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 345. – P. 128275. – URL: https://www.researchgate.net/publication/361733121_Effect_of_sulfate_attack_on_the_composition_and_micro-mechanical_properties_of_C-A-S-H_gel_in_cement-slag_paste_A_combined_study_of_nanoindentation_and_SEM-EDS (дата обращения 16.05.2023).

11. Оптимальные параметры и картина магнитного поля рабочей камеры в аппаратах с вихревым слоем / Р.А. Ибрагимов, Е.В. Королев, Т.Р. Дебердеев, В.В. Лексин. – DOI: 10.31659/0585-430X-2018-761-7-64-67. – Текст : непосредственный // Строительные материалы. – 2018. – № 7. – С. 64–67.

12. Ибрагимов, Р.А. Исследование структурообразования активированного наномодифицированного цементного камня методом ИК-спектроскопии / Р.А. Ибрагимов, Л.И. Потапова, Е.В. Королёв. – DOI: 10.52409/20731523_2021_3_41. – Текст : непосредственный // Известия КГАСУ. – 2021. – № 3 (57). – С. 41–48.

13. Сафронов, В.Н. Структурное состояние и фазовый состав цементного камня при различных технологических приёмах подготовки цементного теста с магнитоактивированной водой затворения / В.Н. Сафронов. – Текст : непосредственный // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2017. – № 4(63). – С. 117–127.

14. Макридин, Н.И. Структурообразование и конструкционная прочность цементных композитов / Н.И. Макридин, Е.В. Королёв, И.Н. Максимова. – Москва : МГСУ, 2013. – 152 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Rakhimov R.Z. Toplivno-energeticheskii kompleks, ekologiya i mineral'nye vyazhushchie veshchestva [Fuel

and Energy Complex, Ecology and Mineral Binders]. In: *Izvestiya KASU [News KSUAE]*, 2022, no. 3 (61), pp. 67–74, doi: 10.52409/20731523_2022_3_67. (In Russ., abstr. in Engl.)

2. Ibragimov R.A., Korolev E.V. Prochnost' kompozitov na osnove modifitsirovannogo portlandtsementa, aktivirovannogo v apparate vikhrevogo sloya [Strength of Composites Based on Modified Portland Cement Activated in a Vortex Layer Apparatus]. In: *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]*, 2021, no. 1, pp. 35–41, DOI: 10.33622/0869-7019.2021.01.35-41. (In Russ., abstr. in Engl.).

3. Zajac M., Wiczorek M., Lothenbach B., Bullerjahn F. Effect of Alkali and Sulfate on Early Hydration of Portland Cements at High Water to Cement Ratio. In: *Construction and Building Materials*, 2022, Vol. 345, p. 128283, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128283. URL: https://www.researchgate.net/publication/361794370_Effect_of_alkali_and_sulfate_on_early_hydration_of_Portland_cements_at_high_water_to_cement_ratio (Accessed 05/16/2023). (In Engl.)

4. Yafeng Rui, Chunxiang Qian. CO₂-Fixing Steel Slag on Hydration Characteristics of Cement-Based Materials. In: *Construction and Building Materials*, 2022, Vol. 354, p. 129193, doi:10.1016/j.conbuildmat.2022.129193. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061822028495> (Accessed 05/16/2023). (In Engl.)

5. Dujian Zou, Ming Zhang, Shanshan Qin, Tiejun Liu. Calcium Leaching from Cement Hydrates Exposed to Sodium Sulfate Solutions. In: *Construction and Building Materials*, 2022, Vol. 351, p. 128975, doi:10.1016/j.conbuildmat.2022.128975. URL: https://www.researchgate.net/publication/363135613_Calcium_leaching_from_cement_hydrates_exposed_to_sodium_sulfate_solutions (Accessed 05/16/2023). (In Engl.)

6. Duc Chinh Chu, Joelle Kleib, Mouhamadou Amar, Mahfoud Benzerzour, Nor-Edine Abriak. Recycling of Dredged Sediment as a Raw Material for the Manufacture of Portland Cement – Numerical Modeling of the Hydration of Synthesized Cement Using the CEMHYD3D Code. In: *Journal of Building Engineering*, 2022, Vol. 48, p. 103871, doi: 10.1016/j.job.2021.103871. URL: https://www.researchgate.net/publication/356968278_Recycling_of_dredged_sediment_as_a_raw_material_for_the_manufacture_of_Portland_cement_-_Numerical_modeling_of_the_hydration_of_synthesized_cement_using_the_CEMHYD3D_code (Accessed 05/16/2023). (In Engl.)

7. Weilong He, Rui Li, Dengpan Nie [et al.] Belite-calcium Sulphoaluminate Cement Prepared by EMR and BS: Hydration Characteristics and Microstructure Evolution Behavior. In: *Construction and Building Materials*, 2022, Vol. 333, p. 127415, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127415. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061822010923> (Accessed 05/16/2023). (In Engl.)

8. Yifan Wang, Hongbo Tan, Xianyu Gu [et al.]. Preparation of Nano-Kaolin by Wet-Grinding Process and Its Application as Accelerator in Portland Cement. In: *Journal of Building Engineering*, 2021, Vol. 44, P. 103401, doi: 10.1016/j.

jobe.2021.103401. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710221012596> (Accessed 05/16/2023). (In Engl.)

9. Maogao Li, Hongbo Tan, Xingyang He, Shouwei Jian [et al.]. Preparation of Nano Cement Particles by Wet-Grinding and Its Effect on Hydration of Cementitious System. In: *Construction and Building Materials*, 2021, Vol. 307, p. 125051, doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.125051. URL: https://www.researchgate.net/publication/355351406_Preparation_of_nano_cement_particles_by_wet-grinding_and_its_effect_on_hydration_of_cementitious_system (Accessed 05/16/2023). (In Engl.)

10. Jun Yang, Qingjun Ding, Gaozhan Zhang, Dongshuai Hou [et al.]. Effect of Sulfate Attack on the Composition and Micro-Mechanical Properties of C-A-S-H gel in Cement-Slag Paste: A Combined Study of Nanoindentation and SEM-EDS. In: *Construction and Building Materials*, 2022, Vol. 345, p. 128275, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128275. URL: https://www.researchgate.net/publication/361733121_Effect_of_sulfate_attack_on_the_composition_and_micro-mechanical_properties_of_C-A-S-H_gel_in_cement-slag_paste_A_combined_study_of_nanoindentation_and_SEM-EDS (Accessed 05/16/2023). (In Engl.)

11. Ibragimov R.A., Korolev E.V., Deberdeev T.R., Leksin V.V. Optimal'nye parametry i kartina magnitnogo polya rabochei kamery v apparatakh s vikhrevym sloem [Optimal Parameters and

Picture of the Magnetic Field of the Working Chamber in Devices with a Vortex Layer]. In: *Stroitel'nye materialy [Construction Materials]*, 2018, no. 7, pp. 64–67, doi: 10.31659/0585-430X-2018-761-7-64-67. (In Russ., abstr. in Engl.)

12. Ibragimov R.A., Potapova L.I., Korolev E.V. Issledovanie strukturoobrazovaniya aktivirovannogo nanomodifitsirovannogo tsementnogo kamnya metodom IK-spektroskopii [Study of the Structure Formation of Activated Nanomodified Cement Stone by IR Spectroscopy]. In: *Izvestiya KGASU [News KSUAE]*, 2021, no. 3 (57), pp. 41–48, doi: 10.52409/20731523_2021_3_41. (In Russ., abstr. in Engl.)

13. Safronov V.N. Strukturnoe sostoyanie i fazovyi sostav tsementnogo kamnya pri razlichnykh tekhnologicheskikh priemakh podgotovki tsementnogo testa s magnitoaktivirovannoi vodoi zatvoreniya [Structural State and Phase Composition of Cement Stone with Various Technological Methods of Preparing Cement Paste with Magnetically Activated Mixing Water]. In: *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta [Journal of Construction and Architecture]*, 2017, no. 4 (63), pp. 117–127. (In Russ., abstr. in Engl.)

14. Makridin N.I., Korolev E.V., Maksimova I.N. Strukuroobrazovanie i konstruktionsnaya prochnost' tsementnykh kompozitov [Structure Formation And Structural Strength of Cement Composites]. Moscow, MGSU Publ., 2013, 152 p. (In Russ.)