

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-75-88

Загороднюк Л.Х., Рахимбаев Ш.М., *Сумской Д.А., Рыжих В.Д.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
*E-mail: pr9nik2011@yandex.ru

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ ГИДРАТАЦИИ ВЯЖУЩИХ КОМПОЗИЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТХОДОВ ВСПУЧЕННОГО ПЕРЛИТОВОГО ПЕСКА

Аннотация. Приведены результаты изучения процессов гидратации вяжущих композиций, полученных при различных соотношениях цемента и отходов вспученного перлитового песка (от 5 до 10 %), в вихревой струйной мельнице, при разных режимах механохимической активации – от одного до трех проходов. Комплексные исследования продуктов гидратации методом рентгенофазового анализа и электронной микроскопии свидетельствуют, что использование высокодисперсных отходов производства вспученного перлитового песка в вяжущих композициях позволяет увеличить содержание гидратных новообразований, вследствие повышения степени гидратации основных клинкерных фаз, а также из-за пуццоланической активности этих отходов. Особое влияние на образование высокопрочной структуры цементного камня оказывает контактная зона между гидратными соединениями и остатками зерен исходных цементов. Структурообразование цементного камня зависит от ряда факторов, на которые можно влиять с помощью различных технологических приемов. При проектировании составов цементных композитов, необходимо гарантировать, чтобы гидратационными продуктами в создаваемой системе присутствовали наряду с низкоосновными гидросиликатами кальция и высокоосновные, а их соотношение должно быть таким, чтобы карбонизация не уменьшала объем сформированной кристаллической фазы цементного камня. Состав продуктов гидратации определяет уровень пересыщения раствора, вид и число посторонних примесей, растворимых в воде, длительность процесса гидратации и т.д. Соответственно меняется и химизм реакций гидратированной системы. Выявлено, что интенсивность дифракционных максимумов, указывающая на присутствие высокоосновных гидросиликатов кальция в составах, которые подвергались механической активации, увеличивается по сравнению с рядовым ПЦ на 18 %. Прочностные характеристики портландцементов, которые подвергались механической активации, возрастают до 15 % по сравнению с исходным ПЦ. Установлена наиболее рациональная вяжущая композиция по составу (№6), механоактивации и максимальной прочностью при сжатии в 28 суточном возрасте – 69,1 МПа.

Ключевые слова: вяжущая композиция, отходы вспученного перлитового песка, рентгенофазовый анализ, процессы гидратации, портландит, гидросиликаты кальция, эттрингит, микроструктура.

Введение. Процессы, которые проходят при гидратации портландцемента, очень сложны по причине одновременного протекания множества взаимодействий элементов системы, которые перекрываясь, воздействуют друг на друга одновременно при ограниченном объеме воды. Значительно труднее проходят процессы гидратации и последующего твердения в вяжущих композициях (ВК), при введении дополнительных минеральных компонентов разных по химическому составу, строению и свойствам в уже сложную систему. Число продуктов гидратации, а также их минеральный состав меняется в зависимости от объема воды в системе.

Методология. В качестве сырьевых материалов использованы: цемент ЦЕМ 1 42,5Н (ГОСТ 31108-2003) ЗАО «Белгородский цемент» и отходы производства вспученного перлитового песка производства ОАО «Осколснаб» (г. Ста-

рый Оскол). Дополнительное измельчение отходов производства вспученного перлитового песка до его введения в композиционное вяжущее не проводилось. Вяжущую композицию получали в центробежном помольном агрегате. Рентгенофазовый анализ проводили на установке ARL X'TRA Thermo Fisher Scientific. Физико-механические свойства вяжущих композиций определяли в соответствии с нормативными требованиями.

Основная часть. Изучением процессов гидратации и формированием структуры цементного теста и камня занимаются многие ученые [1–7]. Среди специалистов-силикатчиков до сих пор не принято единой теории формирования внутренней структуры цементного камня, хотя существуют различные классические теории и подходы.

В процессе образования цементного камня формируются различные виды структур:

условно-коагуляционные, коагуляционные, конденсационные, кристаллизационно-конденсационные, которые накладываются друг на друга, определенным образом изменяя систему, но каждая вносит свой вклад в формирование прочности композита в зависимости от водоцементного отношения, химического и минерального состава цементного композита, условий и продолжительности твердения [8].

Особенно осложняется изучение этих процессов при введении различных минеральных добавок, вносящих свои особенности в формирование структуры цементного камня [9–11].

Исследования показали [12–14], что присутствие в цементном камне гидросиликатов повышенной основности или свободного гидроксида кальция, обеспечивает высокую долговечность композиту. В случае присутствия в системе гидросиликатов пониженной основности, будет складываться тенденция к снижению прочности, что, вероятно, связано с изоморфным замещением кристаллов гидросиликатов кристаллами карбоната кальция.

Проведены исследования по изучению влияния разработанных композиционных вяжущих, имеющих в своем составе минеральные частицы различных минералов, которые создают определенный эффект внутренних микронаполнителей, обеспечивая требуемые свойства создаваемому композиту [15–21].

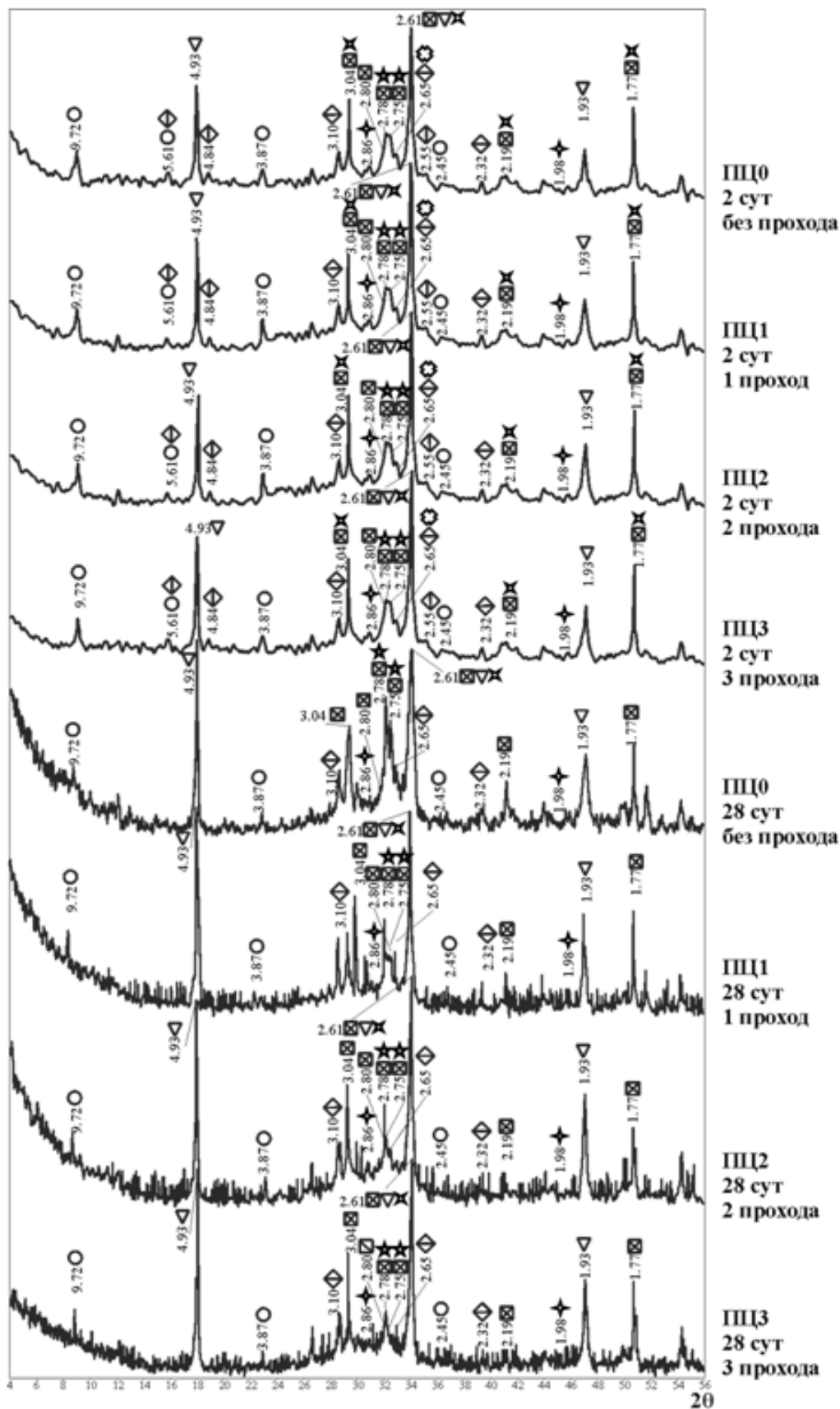
Методом рентгенофазового анализа изучены процессы гидратации портландцементов (рис. 1) и вяжущих композиций, содержащих различное количество минеральной добавки – отходов производства перлитового песка – ОП (от 5 %, 7,5 % и 10 %) в возрастах 2 и 28 суток и полученных в результате механохимической обработки (1, 2 и 3 проходов) в вихревой струйной мельнице. Результаты минерального состава кристаллических новообразований гидратированных портландцементов – ПЦ (1–4, таблица 1) и вяжущих композиций – ВК (5–16, таблица 1), полученных на основе портландцемента и минеральной добавки – отходов производства перлитового песка – ОП представлены на рис. 2–4.

Таблица 1

Свойства вяжущих композиций и цементов

№ составов	Наименование составов	ρ , г/см ³	R _{сж} , МПа	
			через 2 сут	через 28 сут
1	ПЦ0 (без прохода)	2,3	40,1	43,1
2	ПЦ1=>(1 проход)	2,1	46,3	47,2
3	ПЦ2=>(2 проход)	2,1	45,5	49,0
4	ПЦ3=>(3 проход)	2,1	48,4	50,1
5	ВК1.0=>ПЦ/ПП=95/5 % (без прохода)	1,8	13,6	25,8
6	ВК1.1=>ПЦ/ПП=95/5 % (1 проход)	2,0	41,9	51,6
7	ВК1.2=>ПЦ/ПП=95/5 % (2 проход)	2,0	34,8	38,1
8	ВК1.3=>ПЦ/ПП=95/5 % (3 проход)	2,0	42,2	52,0
9	ВК 2.0=>ПЦ/ПП=92,5/7,5 % (без прохода)	1,7	6,9	13,2
10	ВК2.1=>ПЦ/ПП=92,5/7,5 % (1 проход)	1,9	31,9	38,0
11	ВК2.2=>ПЦ/ПП=92,5/7,5 % (2 проход)	2,0	20,0	41,8
12	ВК2.3=>ПЦ/ПП=92,5/7,5 % (3 проход)	2,0	23,4	31,6
13	ВК3.0=>ПЦ/ПП=90/10 % (без прохода)	1,6	5,8	13,2
14	ВК3.1=>ПЦ/ПП=90/10 % (1 проход)	1,8	23,8	45,5
15	ВК3.2=>ПЦ/ПП=90/10 % (2 проход)	2,0	15,3	53,3
16	ВК3.3=>ПЦ/ПП=90/10 % (3 проход)	2,0	21,8	47,8

Примечание: индекс в аббревиатуре ПЦ означает количество проходов через вихревую струйную мельницу (0 – без прохода, 1 – один проход, 2 – два прохода, 3 – три прохода); первый индекс в аббревиатуре ВК означает один из вариантов процентного соотношения портландцемента и отходов производства вспученного перлитового песка в составе ВК (1 – соотношение портландцемента и отходов производства вспученного перлитового песка 95/5 %, 2 – 92,5/7,5 %, 3 – 90/10 %); второй индекс в аббревиатуре ВК – количество проходов через вихревую струйную мельницу (0 – без прохода, 1 – один проход, 2 – два прохода, 3 – три прохода)



∇ – Ca(OH)_2 ($d=4,93; 2,63; 1,93; 1,80 \text{ \AA}$); \circ – $\text{C}_2\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$ ($d=9,77; 5,61; 3,87; 2,45 \text{ \AA}$);
 \diamond – C_2AH_3 ($d=5,61; 4,84; 2,55 \text{ \AA}$); \blacklozenge – C_4AH_{13} ($d=3,10; 2,69; 2,32 \text{ \AA}$);
 \boxtimes – CSH-II ($d=3,04; 2,97; 2,8; 2,78; 2,75; 2,61; 2,19; 1,77 \text{ \AA}$); \star – $\text{C}_3\text{S} + \text{C}_2\text{S}$ ($d=2,78; 2,75 \text{ \AA}$);
 \boxtimes – C_3S ($d=3,04; 2,97; 2,61; 2,19; 1,77 \text{ \AA}$); \blacklozenge – C_2S ($d=2,86; 1,98 \text{ \AA}$); \odot – C_4AF ($d=2,65 \text{ \AA}$)

Рис. 1. Дифрактограммы гидратированных исходного и механоактивированного цементов ПЦ в возрастах 2 и 28 сут

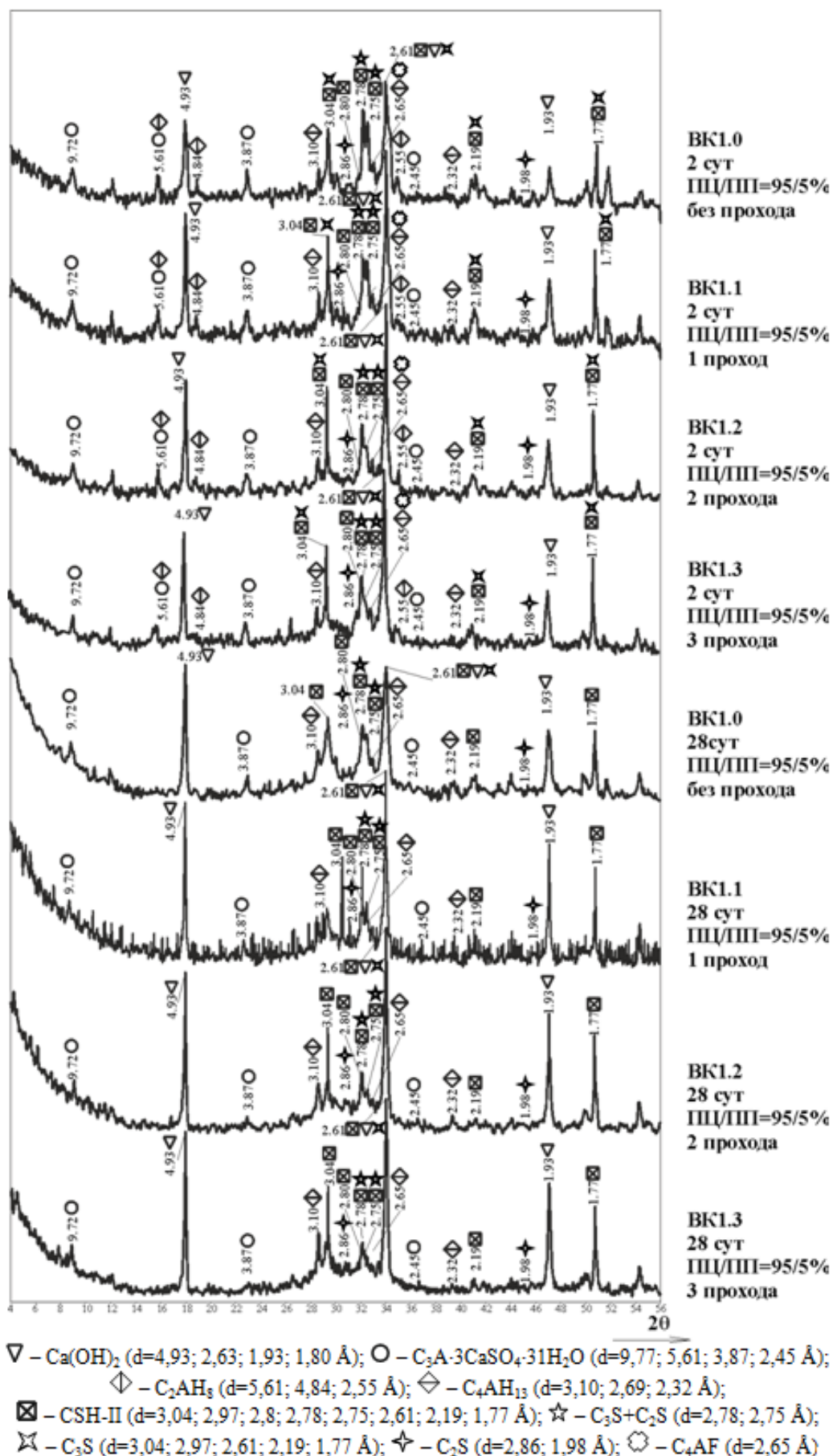


Рис. 2. Дифрактограммы гидратированных исходной и механоактивированных вяжущих композиций ВК (при содержании ОП в количестве 5 %) в возрастах 2 и 28 сут

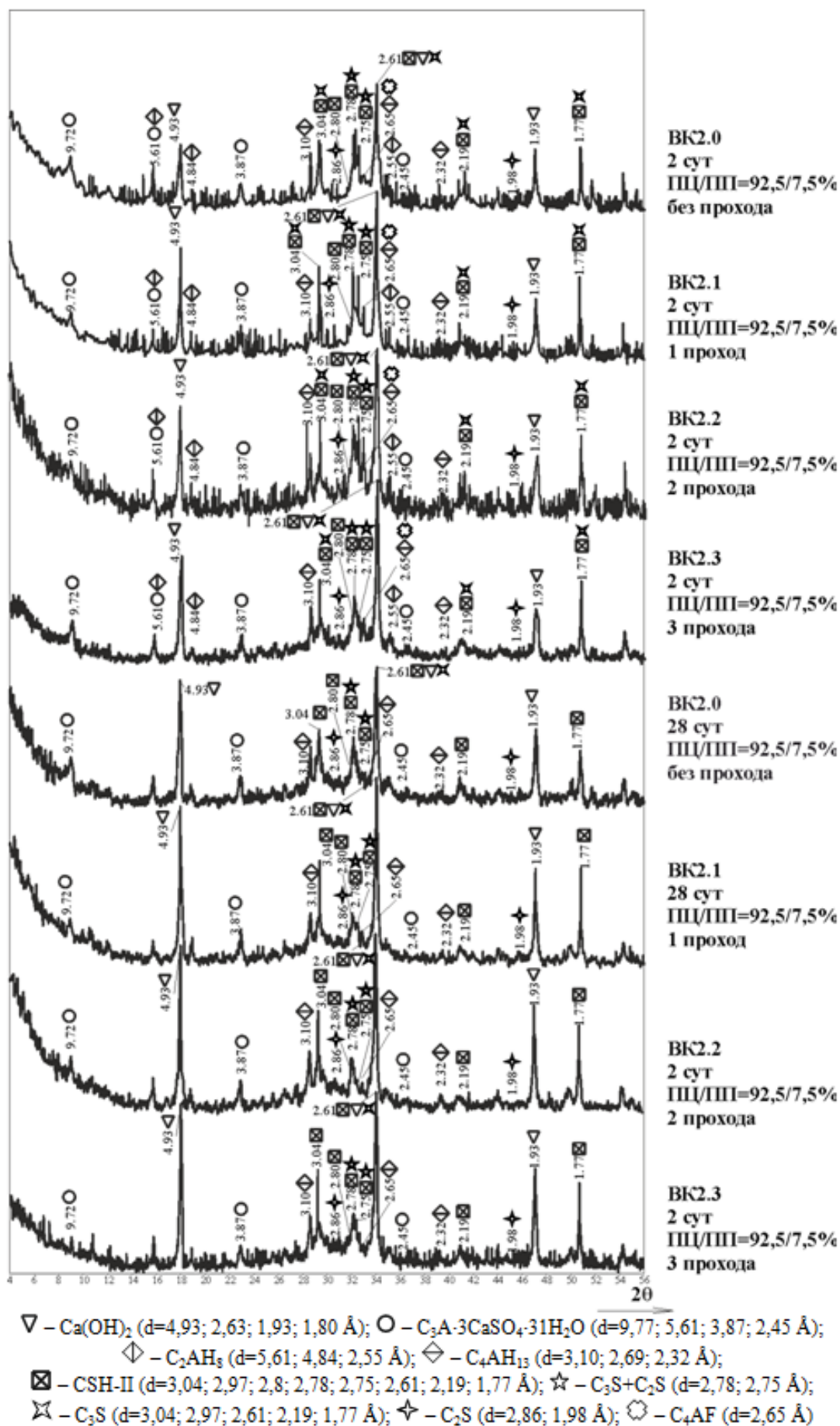
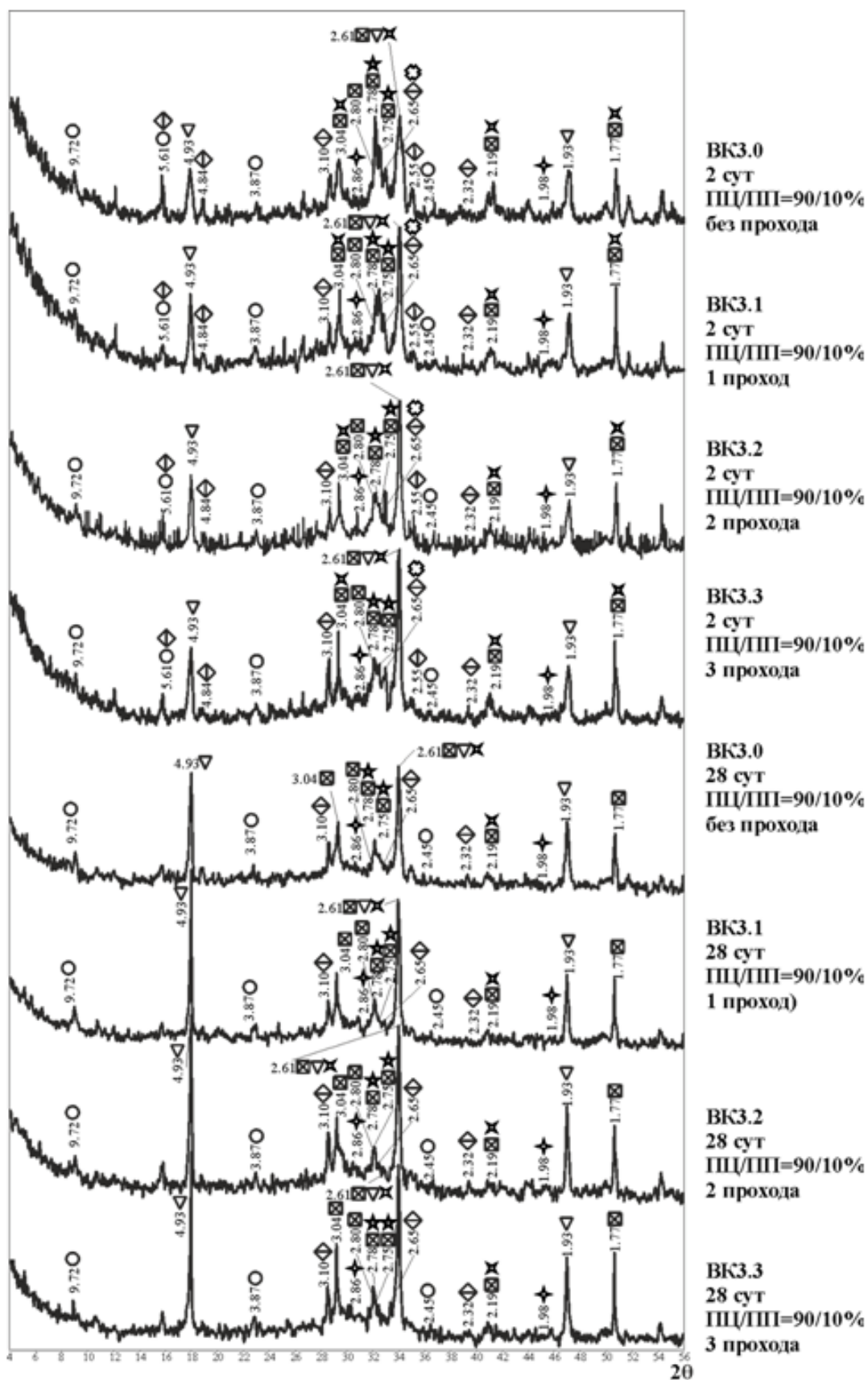


Рис. 3. Дифрактограммы гидратированных исходной и механоактивированных вяжущих композиций ВК (при содержании ОП в количестве 7,5 %) в возрастах 2 и 28 сут



∇ – $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ($d=4,93; 2,63; 1,93; 1,80 \text{ \AA}$); \circ – $\text{C}_3\text{A}\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 31\text{H}_2\text{O}$ ($d=9,77; 5,61; 3,87; 2,45 \text{ \AA}$);
 \diamond – C_2AH_3 ($d=5,61; 4,84; 2,55 \text{ \AA}$); \diamond – C_4AH_{13} ($d=3,10; 2,69; 2,32 \text{ \AA}$);
 \boxtimes – CSH-II ($d=3,04; 2,97; 2,8; 2,78; 2,75; 2,61; 2,19; 1,77 \text{ \AA}$); \star – $\text{C}_3\text{S}+\text{C}_2\text{S}$ ($d=2,78; 2,75 \text{ \AA}$);
 \boxtimes – C_3S ($d=3,04; 2,97; 2,61; 2,19; 1,77 \text{ \AA}$); \star – C_2S ($d=2,86; 1,98 \text{ \AA}$); \odot – C_4AF ($d=2,65 \text{ \AA}$)

Рис. 4. Дифрактограммы гидратированных исходной и механоактивированных вяжущих композиций ВК (при содержании ОП в количестве 10 %) в возрастах 2 и 28 сут

При анализе рентгенограмм (см. рис. 1) гидратированного цемента начального состава и измельченного (активированного) в вихревой струйной мельнице (ВСМ) при пропуске через рабочую камеру аппарата от одного до трех раз количество портландита, содержащееся в образцах растет от 10 до 15 % с возрастанием числа проходов через ВСМ, что указывает на возникновение новых поверхностей у частичек минералов для гидратации вследствие механической активации. При увеличении удельной поверхности ПЦ (уд. поверхность исходного ПЦ=350 м²/кг; измельченного один раз = 640 м²/кг; два раза =770 м²/кг; три раза = 930 м²/кг) интенсивность дифракционных максимумов, характерных для высокоосновных гидросиликатов кальция в рассматриваемых системах увеличивается. Во всех составах количество этtringита изменяется незначительно – в диапазоне 1–3 % (рис.1). В ходе экспериментов установили, что к формированию большого количества высокоосновных гидросиликатов кальция приводит механическая активация ПЦ, которая позволяет в 2,5 раза повысить удельную поверхность.

Величина дифракционных максимумов, присущих портландиту в цементах, полученных механической активацией возрастает до 5 %, пропорционально повышению количества проходов при последующей гидратации начального состава ПЦ и ПЦ механоактивированных.

Интенсивность дифракционных максимумов, указывающая на присутствие высокоосновных гидросиликатов кальция в составах, которые подвергались механической активации, увеличивается по сравнению с рядовым ПЦ на 18 %, что свидетельствует об активном формировании новообразований скрытокристаллической структуры, которые уплотняют структуру, что подтверждается результатами физико-механических испытаний (таблица 1). Прочностные характеристики портландцементов, которые подвергались механической активации, возрастают до 15 % по сравнению с исходным ПЦ. Содержание этtringита незначительно повышается с увеличением степени размельчения.

На РФА образцов гидратированных ПЦ, с механоактивацией в ВСМ от одного до трех раз и без наряду с вышеназванными фазами в возрасте 2 сут присутствуют негидратированные фазы алита, белита, четырехкальциевого алюмоферрита и в возрасте 28 сут – белита. Величина дифракционных максимумов портландита и гидросиликатов кальция повышается, что согласуется с результатами физико-механических испытаний образцов.

Изучение дифрактограмм ВК с соотношением ПЦ/ОП=95/5 %, полученных путем измельчения в ВСМ пропуском от одного до трех раз, в возрасте 2-х сут показало, что при повышении количества проходов дифракционные пики, характерные для портландита уменьшаются до 40 %, что можно объяснить повышением удельной поверхности ВК (рис. 2). Интенсивности дифракционных пиков, которые соответствуют возникающим гидросиликатам кальция, в систему увеличивается до 40 % по мере снижения числа проходов в сравнении с не механоактивированной ВК. Увеличение количества проходов рассматриваемых составов не сказывается на изменении содержания этtringита. Усилению начальной скорости гидратации предшествует рост тонкости помола ВК.

При достижении 28 суток твердения интенсивность дифракционных пиков портландита повышается до 20 % в зависимости от количества проходов в ВСМ, а интенсивность дифракционных максимумов, характерных для гидросиликатов кальция возрастает до 35 % при одном проходе в сравнении с начальным составом вяжущей композиции, прочностные характеристики ВК активированных в мельнице возрастают до 50 % по сравнению с ВК рядовой (не измельченной). Количественное содержание этtringита остается на том же уровне.

Почти все активные рефлексы образцов через 2 сут соответствуют кристаллическим не взаимодействующим фазам ПЦ, но, ряд интенсивностей можно отнести к высокоосновным гидросиликатам кальция.

Взаимодействия, проходящие на границе раздела фаз ЦП–минеральная добавка, имеют топомический характер. Минеральная добавка в количестве 5 % через 28 суток приводит к большому повышению прочности на сжатие в сравнении с рядовым составом ПЦ (не измельченным), из-за значительного содержания кристаллогидратов, которые имеют значительное влияние при образовании кристаллического скелета гидратированного ПЦ.

Исследование дифрактограмм ВК (ПЦ/ОП=92,5/7,5 %), измельченных в ВСМ от одного до трех раз, через 2 сут показал, что дифракционные пики, свойственные портландиту, возрастают на 45 % при снижении числа проходов. Данное явление можно объяснить высокой дисперсностью состава и большой поверхностью для прохождения реакций; интенсивность пиков, характерных для гидросиликатов кальция увеличивается до 30 % при снижении количества проходов. Количественное содержание этtringита не меняется, оставаясь на прежнем уровне (рис. 3).

Дифракционные пики портландита в возрасте 28 сут повышаются на 30 % при росте числа проходов в ВСМ. Со снижением числа проходов рост числа вторичных гидросиликатов кальция составляет 30 %, что можно объяснить сложнейшими взаимодействиями гидросиликатов кальция и гидроалюминатов кальция, находящихся в системе, и излишним числом поверхностей образуемых минеральной добавкой.

Анализ показывает, что физико-механические характеристики вяжущих композиций после механоактивирования при соотношении компонентов цемент – отходы производства = 92,7 – 7,5 % возрастают на 58 % в сравнении с исходной вяжущей композицией.

Изучение рентгенограмм вяжущих композиций в ранние сроки твердения – 2 сут, предварительно активированных в вихревой струйной мельнице при соотношении сырьевых компонентов: цемент – ОП = 90 – 10 % свидетельствует, что величина основного максимума дифрактограммы гидросиликатов кальция возрастает до 48% в сравнении с неактивированной вяжущей композицией аналогичного состава (рис. 4).

В 28-суточном возрасте в вяжущих композициях одинакового состава отмечается присутствие тех же фаз, отмеченных выше. Присутствие портландита с возрастанием активационной обработки снижается до 41 %, а величина дифракционных максимумов, присущих гидросиликатам кальция возрастает на 28 %. Отмечается, что эттрингит содержится в постоянных количествах в исследуемых вяжущих композициях.

Проведенный рентгенофазовый анализ позволил установить, что с увеличением присутствия доли отходов производства вспученного перлитового песка в исследуемых вяжущих композициях с содержанием до 10 % на состав новообразований не влияет.

Диаграммы, приведенные на рис. 5 отражают сравнительные результаты по наличию и интенсивности основных минеральных фаз во всех исследуемых вяжущих композициях и портландцементов, полученных при активизации в помольном агрегате.

Проведенный сравнительный анализ исследуемых вяжущих композиций, активированных в струйной мельнице при разных активационных режимах и различной дозировке минеральной добавки и цемента, при гидратации их в возрасте 2 и 28 сут показали определенные особенности:

– в 2-х суточном возрасте сравнение рентгенограмм механоактивированных цементов и обычного портландцемента выявили, что содержание основных фаз примерно одинаковое $C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$, C_4AH_{13} , C_2AH_8 , $Ca(OH)_2$, CSH-II. При этом предел прочности при сжатии

вяжущих композиций возрастает в возрасте 2 сут до 13%, а к 28 сут – до 15%, что присуще всем вяжущим композициям, объясняемое формированием более плотной структуры за счет высокой удельной поверхности частиц вяжущей композиции;

– установлено, что при меньшем числе проходов вяжущих композиций возрастает количество портландита, одновременно увеличивается содержание гидросиликатов кальция, что можно объяснить повышенным содержанием в системе высокодисперсных минеральных частиц – отходов производства. К возрасту 28 сут в вяжущих композициях возникают скрытокристаллические новообразования по всему объему, отмечается наличие значительного количества минеральных подложек из отходов производства вспученного перлитового песка, на которых формируются кристаллические сростки и прорастают по всему объему композита, что отчетливо видно на микрофотографиях;

– вяжущая композиция, содержащая 7,5 % вспученного перлитового песка, при возрастании удельной поверхности, содержит портландита до 29 %, а гидросиликатов кальция до 20 %, данное обстоятельство указывает на формирование в системе сложных скрытокристаллических процессов, что отражается на увеличении физико-механических показателей образцов вяжущей композиции на 52 % к возрасту 28 сут;

– при содержании в вяжущей композиции до 10 % вспученного перлитового песка показало, что с уменьшением механоактивации наблюдается повышенное содержание гидросиликатов кальция на 28 %, при содержании количества портландита до 41 %. В этих составах прочность увеличивается почти в два раза, что объясняется формированием субмикроструктурной структуры на частичках перлитового песка, как на подложках, при этом формируются микрокристаллы, прорастая в межзерновом пространстве, заполняя поры и пустоты.

Проведенные исследования свидетельствуют, что все вяжущие композиции представлены основными продуктами гидратации, характерными для портландцемента: C_2AH_8 , $Ca(OH)_2$, C_4AH_{13} , CSH-II, $C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$. Следует отметить, содержание этих фаз в различных составах отлично, что можно объяснить формированием сложной субмикроструктурной структурой, обусловленной присутствием высокодисперсных отходов перлитового производства, а также их количества и особенностью их распределения в объеме материала, вследствие особенностей структуры.

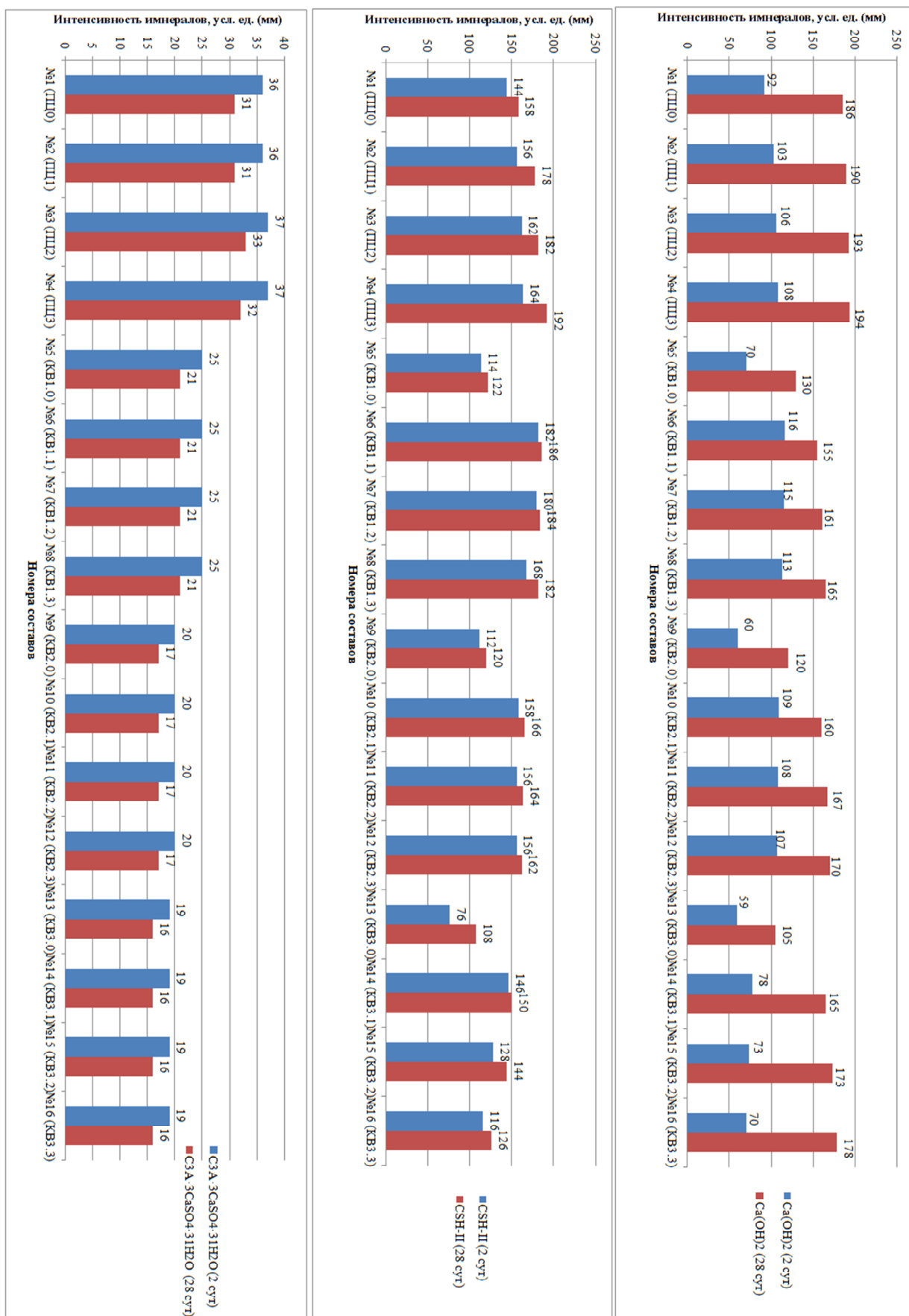


Рис. 5. Интенсивности основных дифракционных максимумов в условных единицах (мм) портландита $Ca(OH)_2$, гидросиликатов кальция CSH-II и этtringита $C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 3H_2O$

Установлена наиболее рациональная вяжущая композиция по составу (№6), механоактивации и максимальной прочностью при сжатии в 28 суточном возрасте – 69,1 МПа. Данную вяжущую композицию целесообразно рекомендовать для последующих исследований при получении теплоизоляционных растворов.

Комплексные исследования продуктов гидратации методом рентгенофазового анализа и

электронной микроскопии (рис. 6) свидетельствуют, что использование высокодисперсных отходов производства вспученного перлитового песка в вяжущих композициях позволяет увеличить содержание гидратных новообразований, вследствие повышения степени гидратации основных клинкерных фаз, а также из-за пуццоланической активности этих отходов.

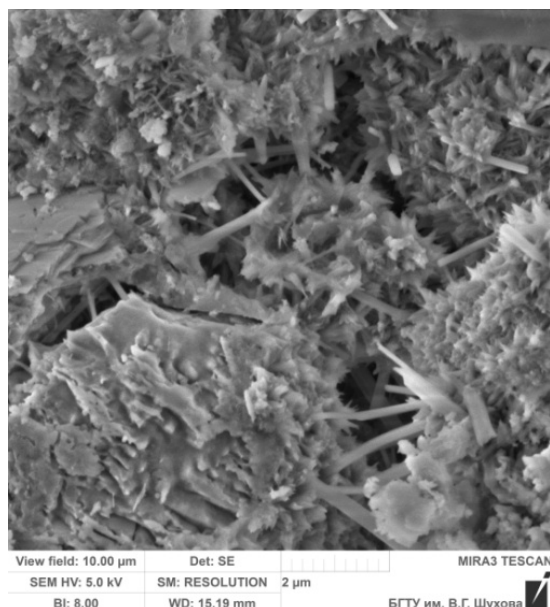


Рис. 6. Микрофотографии вяжущих композиций в возрасте 28 сут состава портландцемент-отходы производства вспученного перлитового песка = 95–5 %, механоактивированные один раз в вихревой струйной мельнице

Установлено, что при твердении цементных вяжущих композиций, приготовленных с использованием различного количества минеральных отходов – вспученного перлитового песка имеют место основные процессы, присущие классической гидратации обычного портландцемента.

Отмечается, что используемая минеральная добавка не влияет на последовательность основных химических взаимодействий в системе, но при этом скорость протекания реакции увеличивается.

Повышение реакционной способности в системе вяжущих композиций объясняется комплексным действием минеральных добавок, оказывающих на первом этапе разобшающее действие в системе, так как вначале они работают, как мельчайший наполнитель, разбивая цементные частицы и обеспечивая доступ воды к ним, и на втором этапе, работают как гидравлическая добавка, поглощая $\text{Ca}(\text{OH})_2$, из данной системы и выводя гидроксид кальция из реакционной сферы, ускоряя этим процесс гидролиза C_3S и C_2S .

Выводы. Таким образом, при твердении цементных вяжущих композиций, приготовленных

с использованием различного количества минеральных отходов – вспученного перлитового песка имеют место основные процессы, присущие классической гидратации обычного портландцемента, а также особенности, обусловленные формированием высокоосновных гидратных новообразований и интенсивным протеканием ионообменных процессов с участием перлитовой минеральной добавки.

Источник финансирования. РФФИ научно-исследовательского проекта № 18-29-24113 с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им.В.Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Joseph S., Bishnoi S., Van Balen K., Cizer Ö. Modeling the effect of fineness and filler in early-age hydration of tricalcium silicate // Journal of the American Ceramic Society. 2017. Т. 100. № 3. С. 1178–1194.
2. Wang X.-Y., Luan Y. Modeling of Hydration, Strength Development, and Optimum Combinations of Cement-Slag-Limestone Ternary Concrete // International Journal of Concrete Structures and Materials. 2018. Т. 12. № 2. С. 12.

3. Ley-Hernandez A.M., Lapeyre J., Cook R., Kumar A., Feys D. Elucidating the Effect of Water-To-Cement Ratio on the Hydration Mechanisms of Cement // ACS Omega. 2018. Т. 3. № 5. P. 5092–5105.
4. Biernacki J.J., Bullard J.W., Sant G., Brown K., Glasser F., Jones S., Ley T., Livingston R., Nicoleau L., Olek J., Sanchez F., Shahsavari R., Stutzman P.E., Sobolev K., Prater T. Cements in the 21st century: Challenges, perspectives, and opportunities // Journal of the American Ceramic Society. 2017. Т. 100. № 7. С. 2746–2773.
5. Dove P.M., Han N., De Yoreo J.J. Mechanisms of classical crystal growth theory explain quartz and silicate dissolution behavior // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2005. Т. 102. № 25. С. 15357–15362.
6. Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.H., Tolmacheva M.M., Smolikov A.A., Shekina A.Y., Shakarna M.H.I. Structure-formation of contact layers of composite materials // Life Science Journal. 2014. № 11. С. 948–953.
7. Volodchenko A.A., Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.H., Volodchenko A.N. and Kuprina A.A. The control of building composite structure formation through the use of multifunctional modifiers. Research journal of applied sciences. 2015. № 10. С. 931–936.
8. Комохов П.Г., Шангина Н.Н. Модифицированный цементный бетон его структура и свойства // Цемент и его применение, 2002. №1. С. 43–46.
9. Сумской Д.А., Загороднюк Л.Х., Жерновский И.В. Особенности формирования кристаллических новообразований в вяжущих композициях в зависимости от технологии их приготовления // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. № 6. С. 71–78.
10. Загороднюк Л.Х., Лесовик В.С., Шамшуrows А.В., Беликов Д.А. Композиционные вяжущие на основе органо-минерального модификатора для сухих ремонтных смесей // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. № 5. С.25–31.
11. Kuprina A.A., Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.H., Elistratkin M.Y. Anisotropy of Materials Properties of Natural and Man-Triggered Origin // Research Journal of Applied Sciences. 2014. № 9. С. 816–819.
12. Fu J., Kamali-Bernard S., Bernard F., Cornen M. Comparison of mechanical properties of C-S-H and portlandite between nano-indentation experiments and a modeling approach using various simulation techniques // Hydration kinetics and rheological behavior // Construction and Building Materials. 2018. Т. 184. С. 304–310.
13. Matalkah F., Soroushian P. Carbon dioxide integration into alkali aluminosilicate cement particles for achievement Composites Part B: Engineering. 2018. Т. 151. С. 127–138.
14. Barbosa W., Ramalho R.D., Portella K.F. Influence of gypsum fineness in the first hours of cement paste: of improved properties // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 196. P. 1478–1485.
15. Yang J.-M., Shi C.-J., Chang Y., Yang N. Hydration and hardening characteristics of magnesium potassium phosphate cement paste containing composite retarders // JianzhuCailiaoXuebao / Journal of Building Materials. 2013. Т. 16. № 1. С. 43–49.
16. Zhu Q.-H., Zhang L.-Z., Min X.-M., Yu Y.-X., Zhao X.-F., Li J.-H. Comb-typed polycarboxylate superplasticizer equipped with hyperbranched polyamide teeth // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2018. № 553. С. 272–277.
17. Volodchenko A.A., Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.H., Volodchenko A.N. and Prasolova E.O. Influence Of The Inorganic Modifier Structure On Structural Composite Properties. International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Т. 10. № 19. С. 40617–40622.
18. Строкова В.В., Жерновский И.В., Нелюбова В.В., Сумин А.В. Фазовые трансформации при гидратации модифицированного цементного камня // Труды Кольского научного центра РАН. 2017. Т. 8. № 5-1. С. 199–204.
19. Сумской Д.А. Теплоизоляционный раствор на основе композиционного вяжущего // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2018. Т. 80. №2. С. 283–289.
20. Демьянова В.С., Калашников В.И., Борисов А.А. Об использовании дисперсных наполнителей в цементных системах // Жилищное строительство. 1999. № 1. С. 17–18.
21. Терликовский Е.В., Третник В.Ю. Использование механической активации для модифицирования неорганических материалов // Тезисы докладов V Всесоюзного семинара 8–10 сентября 1987 г. Таллин. 1987. С. 27–28.

Информация об авторах

Загороднюк Лилия Хасановна, доктор технических наук, профессор кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: LHZ47@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Рахимбаев Шарк Матрасулович, доктор технических наук, профессор кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: LHZ47@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Сумской Дмитрий Алексеевич, ассистент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: pr9nik2011@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Рыжих Владислав Дмитриевич, аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: ryzhikh.vlad@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 11.10.2020 г

© Загороднюк Л.Х., Рахимбаев Ш.М., Сумской Д.А., Рыжих В.Д., 2020

Zagorodnyuk L.Kh., Rakhimbaev S.M., *Sumskoy D.A., Ryzhikh V.D.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: pr9nik2011@yandex.ru*

FEATURES OF THE PROCESSES OF HYDRATION OF BINDING COMPOSITIONS USING WASTE OF EXPANDED PERLITE SAND

Abstract. *The results of studying the processes of hydration of binder compositions obtained at different ratios of cement and waste of expanded perlite sand (from 5 to 10 %), in a vortex jet mill, under different modes of mechanical and chemical activation – from one to three passes are presented. Comprehensive studies of hydration products by X-ray phase analysis and electron microscopy indicate that the use of highly dispersed wastes from the production of expanded perlite sand in binding compositions allows an increase in the content of hydrated neoplasms due to an increase in the degree of hydration of the main clinker phases, as well as due to the pozzolanic activity of these wastes. The contact zone between the hydrated compounds and the remnants of the grains of the original cements has a special effect on the formation of a high-strength structure of the cement stone. The structure formation of a cement stone depends on a number of factors, which can be influenced by various technological methods. When designing compositions of cement composites, it is necessary to ensure that hydration products in the created system are present along with low-basic calcium hydrosilicates and high-basic ones. Their ratio should be such that carbonization does not reduce the volume of the formed crystalline phase of the cement stone. The composition of the hydration products determines the level of supersaturation of the solution, the type and number of impurities soluble in water, the duration of the hydration process, etc. The chemistry of the reactions of the hydrated system changes accordingly. It is found that the intensity of the diffraction maxima, indicating the presence of highly basic calcium hydrosilicates in the compositions that underwent mechanical activation, increases by 18 % in comparison with the ordinary PC. The strength characteristics of Portland cements, which have undergone mechanical activation, increase up to 15 % compared to the original PC. The most rational binder composition is established in terms of composition (No. 6), mechanical activation and maximum compressive strength at 28 days of age – 69,1 MPa.*

Keywords: *binding composition, waste of expanded perlite sand. x-ray phase analysis, hydration processes, portlandite, calcium hydrosilicates, ettringite, microstructure.*

REFERENCES

1. Joseph S., Bishnoi S., Van Balen K., Cizer Ö. Modeling the effect of fineness and filler in early-age hydration of tricalcium silicate. *Journal of the American Ceramic Society*. 2017. Vol. 100. No. 3. Pp. 1178–1194.
2. Wang X.-Y., Luan Y. Modeling of Hydration, Strength Development, and Optimum Combinations of Cement-Slag-Limestone Ternary Concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2018. Vol. 12. No. 2. Pp. 12.
3. Ley-Hernandez A.M., Lapeyre J., Cook R., Kumar A., Feys D. Elucidating the Effect of Water-To-Cement Ratio on the Hydration Mechanisms of

Cement. *ACS Omega*. 2018. Vol. 3. No. 5. Pp. 5092–5105.

4. Biernacki J.J., Bullard J.W., Sant G., Brown K., Glasser F., Jones S., Ley T., Livingston R., Nicoleau L., Olek J., Sanchez F., Shahsavari R., Stutzman P.E., Sobolev K., Prater T. Cements in the 21st century: Challenges, perspectives, and opportunities. *Journal of the American Ceramic Society*. 2017. Vol. 100. No. 7. Pp. 2746–2773.
5. Dove P.M., Han N., De Yoreo J.J. Mechanisms of classical crystal growth theory explain quartz and silicate dissolution behavior. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2017. Vol. 114. No. 12. Pp. 3111–3116.

States of America. 2005. Vol. 102. No. 25. Pp. 15357–15362.

6. Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.H., Tolmacheva M.M., Smolikov A.A., Shekina A.Y., Shakarna M.H.I. Structure-formation of contact layers of composite materials. *Life Science Journal*. 2014. No. 11. Pp. 948–953. (rus)

7. Volodchenko A.A., Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.H., Volodchenko A.N., Kuprina A.A. The control of building composite structure formation through the use of multifunctional modifiers. *Research journal of applied sciences*. 2015. No 10. Pp. 931–936. (rus)

8. Komokhov P.G., Shangina N.N. Modified cement concrete, its structure and properties [Modifitsirovanny tsementnyy beton ego struktura i svoystva]. *Cement and its application*. 2002. No. Pp. 43–46. (rus)

9. Sumskey D.A., Zagorodnyuk L.Kh., Zhernovskiy I.V. Features of the formation of crystalline neoplasms in binding compositions depending on the technology of their preparation [Osobennosti formirovaniia kristallicheskikh novoobrazovaniy v viazhushchikh kompozitsiyakh v zavisimosti ot tekhnologii ikh prigotovleniya]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2018. No. 6. Pp. 71–78. (rus)

10. Zagorodnyuk L.Kh., Lesovik V.S., Shamshurov A.V., Belikov D.A. Composite binders based on an organic-mineral modifier for dry repair mixtures [Kompozitsionnye viazhushchie na osnove organo-mineralnogo modifikatora dlia sukhikh remontnykh smesei]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2014. No. 5. Pp. 25–31. (rus)

11. Kuprina A.A., Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.H., Elistratkin M.Y. Anisotropy of Materials Properties of Natural and Man-Triggered Origin. *Research Journal of Applied Sciences*. 2014. No. 9. Pp. 816–819. (rus)

12. Fu J., Kamali-Bernard S., Bernard F., Cornen M. Comparison of mechanical properties of CSH and portlandite between nano-indentation experiments and a modeling approach using various simulation techniques. Hydration kinetics and rheological behavior. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 184. Pp. 304–310.

13. Matalkah F., Soroushian P. Carbon dioxide integration into alkali aluminosilicate cement particles for achievement Composites Part B: Engineering. 2018. Vol. 151. Pp. 127–138.

14. Barbosa W., Ramalho R.D., Portella K.F. Influence of gypsum fineness in the first hours of cement paste: of improved properties. *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 196. Pp. 1478–1485.

15. Yang J.-M., Shi C.-J., Chang Y., Yang N. Hydration and hardening characteristics of magnesium potassium phosphate cement paste containing composite retarders. *Jianzhu Cailiao Xuebao. Journal of Building Materials*. 2013. Vol. 16. No. 1. Pp. 43–49.

16. Zhu Q.-H., Zhang L.-Z., Min X.-M., Yu Y.-X., Zhao X.-F., Li J.-H. Comb-typed polycarboxylate superplasticizer equipped with hyperbranched polyamide teeth. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2018. No. 553. Pp. 272–277.

17. Volodchenko A.A., Lesovik V.S., Zagorodnyuk L.H., Volodchenko A.N., Prasolova E.O. Influence Of The Inorganic Modifier Structure On Structural Composite Properties. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015. Vol. 10. No. 19. Pp. 40617–40622. (rus)

18. Strokova V.V., Zhernovskiy I.V., Nelyubova V.V., Sumin A.V. Phase transformations during the hydration of modified cement stone [Fazovye transformatsii pri gidratatsii modifitsirovannogo tsementnogo kamnia]. *Transactions of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences*. 2017. Vol. 8. No. 5-1. Pp. 199–204. (rus)

19. Sumskey D.A. Thermal insulation solution based on a composite binder [Teploizoliatsionnyi rastvor na osnove kompozitsionnogo viazhushchego]. *Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2018. Vol. 80. No. 2. Pp. 283–289. (rus)

20. Demyanova V.S., Kalashnikov V.I., Borisov A.A. On the use of dispersed fillers in cement systems [Ob ispolzovanii dispersnykh napolnitelei v tsementnykh sistemakh]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*. 1999. No. 1. Pp. 17–18. (rus)

21. Terlikovsky E.V., Tretnik V.Yu. The use of mechanical activation for the modification of inorganic materials [Ispolzovanie mekhanicheskoi aktivatsii dlia modifitsirovaniia neorganicheskikh materialov]. *Abstracts of the V All-Union Seminar 8–10 September 1987 Tallinn*. 1987. Pp. 27–28. (rus)

Information about the authors

Zagorodnyuk, Liliya K. DSc, Professor. E-mail: zagorodnyk.lh@bstu.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Rakhimbaev, Shark M. DSc, Professor. E-mail: zagorodnyk.lh@bstu.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Sumskoy, Dmitry A. Assistant. E-mail: pr9nik2011@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Ryzhikh, Vladislav D. Postgraduate student. E-mail: pr9nik2011@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 11.10.2020

Для цитирования:

Загороднюк Л.Х., Рахимбаев Ш.М., Сумской Д.А., Рыжих В.Д. Особенности процессов гидратации вяжущих композиций с использованием отходов вспученного перлитового песка // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 11. С. 75–88. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-75-88

For citation:

Zagorodnyuk L.Kh., Rakhimbaev S.M., Sumskoy D.A., Ryzhikh V.D. Features of the processes of hydration of binding compositions using waste of expanded perlite sand. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 11. Pp. 75–88. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-11-75-88