

## ВЛИЯНИЕ ВВОДА В ПОРТЛАНЦЕМЕНТ СУЛЬФОФЕРРИТНОГО КЛИНКЕРА НА СВОЙСТВА ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

Борисов И.Н., Гребенюк А.А.

*В процессе развития экономики и общества перед промышленностью ставятся определенные задачи, реализация которых на том или ином этапе необходима. Получение безупрочных вяжущих материалов из вторичных материалов способно одновременно решить такие проблемы как обеспечение специальным цементом необходимого сектора строительства, а также решение экологического вопроса, становящимся с каждым годом все более актуальным.*

**Ключевые слова:** смешанные цементы, сульфферритный клинкер, линейное расширение, плотные структуры, железистый этрингит.

На сегодняшний день развитие промышленности тесно связано со строительной отраслью, которая в свою очередь не может обходиться без качественных строительных материалов, в частности такого незаменимого на данный момент материала, как портландцемент. Полученный еще в первой половине XIX века, он с течением лет стал главным связующим материалом при строительстве и обеспечил развитие всех сфер промышленности.

Решение множества инженерных задач требует применение цементов, обладающих рядом специальных свойств, которые необходимы сооружениям. Так, для строений, которые подвергаются воздействию агрессивных сред, нужен цемент, обладающий устойчивостью к коррозии, для фиксации трубы в газо-нефтедобывающих скважинах – тампонажные цементы и т.д.

Согласно тенденциям современного рынка и пути максимального снижения себестоимости продукции, при сохранении регламентированных качеств материалов, целесообразна замена традиционных сырьевых материалов на отходы других производств. Применение вторичных сырьевых компонентов при производстве портландцемента показало возможность использования альтернативного сырья в цементной

промышленности [1-3]. Получение специальных вяжущих материалов из вторичного сырья изучено не настолько хорошо, как производство портландцемента, но является одним из приоритетных направлений исследований отрасли вяжущих материалов [4, 5].

Целью данной статьи является сравнение смешанных цементов, обладающих безупрочными свойствами, полученных при добавлении в портландцемент различных составов сульфферритных клинкеров (СФК).

В качестве сырьевых материалов при получении СФК использовались мел, огарки, ферритный отход (медеплавильный шлак ЗАО «Карабашмедь») и гипсовый камень. Используя расчетные модули, были получены составы трехкомпонентных сырьевых смесей [6] (при использовании ферритного  $\Phi_m$  и сульфатного  $C_m$  расчетных модулей) и четырехкомпонентных сырьевых смесей [7] (в качестве третьего расчетного модуля в дополнение к  $\Phi_m$  и  $C_m$  используется силикоферритный модуль  $СФ_m$ ). На основании полученных химических составов были рассчитаны минералогические составы СФК. Рассчитанные химические и минералогические составы представлены в таблице 1.

Таблица 1 Химический и минералогический составы СФК

Наименование	Химический состав СФК, %								Минералогический состав СФК, %		
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	MgO	R <sub>2</sub> O	Проч.	C <sub>2</sub> F·CaSO <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A <sub>3</sub> ·CaSO <sub>4</sub>
3 К (I)	41,45	1,96	0,58	35,58	17,94	1,38	0,88	0,23	90,73	5,64	1,15
3 К (II)	49,56	13,89	2,31	20,89	11,05	1,38	0,72	0,20	53,26	39,87	4,60
4 К (I)	43,38	4,81	0,99	32,07	16,30	1,38	0,84	0,22	81,60	13,79	1,98
4 К (II)	45,35	7,70	1,41	28,52	14,63	1,38	0,80	0,22	72,55	22,07	2,82
4 К (III)	48,59	12,46	2,10	22,65	11,88	1,38	0,74	0,20	57,63	35,72	4,20

Все приведенные расчеты ориентированы на получение двухкальциевого сульфферрита. Обозначениям 3 К (I) и 3 К (II) соответствуют трехкомпонентные сырьевые смеси, в которых роль железосодержащего компонента выполняют огарки и ферритный отход соответственно. Обозначения 4 К (I), 4 К (II) и 4 К (III) приняты для четырехкомпонентных сырьевых смесей, в которых присутствуют как огарки, так и ферритный отход. Значения силикоферритного модуля для этих смесей следующие: 4 К (I) –  $СФ_m=0,15$ ; 4 К (II) –  $СФ_m=0,27$  и 4 К (III) –  $СФ_m=0,55$ .

В процессе получения СФК из техногенного сырья возможно образование в процессе обжига побочных продуктов реакции, которые отрицательно сказываются

на свойствах конечного продукта. Так, в работах [8, 9] установлено, что при синтезе СФК в температурном интервале 900 – 1230 °С образуется сульфосиликат кальция  $2C_2S·CaSO_4$ . Поскольку реакция образования сульфосиликата кальция, начинающаяся при 900 °С, протекает раньше по сравнению с реакцией сульфатизации ферритов кальция, можно заключить, что ферриты кальция в полной мере будут образовывать твердый раствор с сульфатом кальция только после разложения сульфатного спурита на белит и ангидрит. Изменение минералогического состава образующихся в температурном интервале 900 – 1230 °С фаз при синтезе СФК представлено на рисунке 1.

Обжиг сырьевых смесей производили в печи с

карбид кремневыми нагревателями. Температура обжига для составов СФК 3 К (I) и 3 К (II) составляла 1280 °С с изотермической выдержкой при этой температуре в течение 30 минут. Обжиг четырехкомпонентных смесей производился в два этапа:

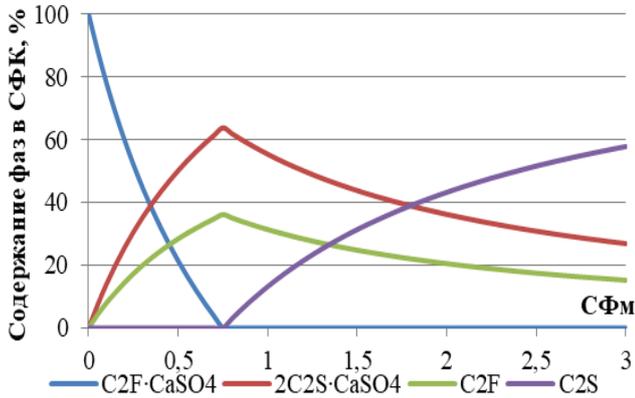


Рисунок 1 – Изменение количества образующихся в интервале 900-1200 °С фаз в зависимости от значений СФМ

1) обжиг до полной диссоциации карбоната кальция при температуре 860 °С и выдержкой при этой температуре в течение 40 минут с последующим резким охлаждением на воздухе;  
 2) резкий обжиг (помещение охлажденной сырьевой смеси в разогретую до температуры 1100 °С печь) при температуре 1280 °С и последующей выдержкой при этой температуре в течение 30 минут.  
 Подобный режим позволяет нивелировать количество образующегося в процессе обжига сульфосиликата кальция. Температура первой стадии обжига выбрана исходя из того, что при этой температуре происходит

практически полная диссоциация карбоната кальция в сырьевых смесях, но количество образующегося двухкальцевого силиката при ней минимально. Так как двухкальцевый силикат еще не успел образоваться в своем полном объеме, то реакция взаимодействия между двухкальцевым силикатом и сульфатом кальция становится маловероятной. Скорость реакции образования твердого раствора между двухкальцевым ферритом и ангидритом близка к максимальным значениям при температуре 1100 °С, чем и обусловлен выбор температуры второй стадии обжига.

Для определения полноты реакций образования минералов при синтезе СФК и определения минералогического состава портландцемента АО «Себряковцемент» на дифрактометре ARL X'TRA Thermo Fisher Scientific были получены рентгенограммы СФК и портландцемента (рисунок 2). Смещение пиков фазы двухкальцевого феррита  $C_2F$  [от 2,685 до 2,675 Å] и уменьшение интенсивности пиков ангидрита для всех составов СФК свидетельствуют о прохождении реакций сульфатизации двухкальцевого феррита. Помимо фазы  $C_2F-CaSO_4$  в СФК присутствуют некоторое количество ангидрита, не вступившего в реакцию образования твердого раствора, а также белит. Минералогический состав портландцемента представлен такими минералами как алит, белит, трехкальцевый алюминат и четырехкальцевый алюмоферрит.

Синтезированные СФК измельчили в мельнице до приблизительно равных удельных поверхностей, значения которых определяли на ПСХ-500.

Для 3 К (I) и 3 К (II) они составили 462 и 457 м<sup>2</sup>/кг, для составов 4 К (I), 4 К (II) и 4 К (III) — 466, 460 и 473 м<sup>2</sup>/кг соответственно.

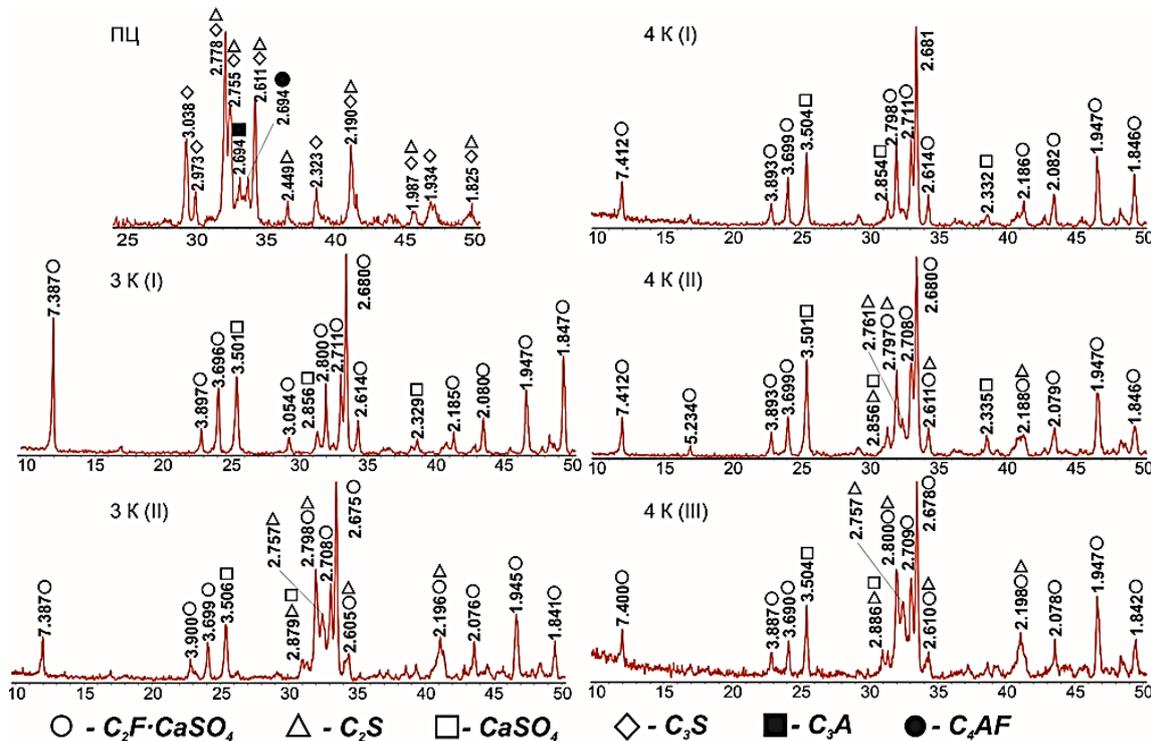


Рисунок 2 – Минералогический состав используемого портландцемента и синтезированных СФК

Значение удельной поверхности было выбрано исходя из литературных данных [10]. Для детального определения фракционного состава используемых компонентов смешанных цементов был проведен гранулометрический анализ на лазерном анализаторе размеров частиц ANALYSETTE 22 NanoTec plus.

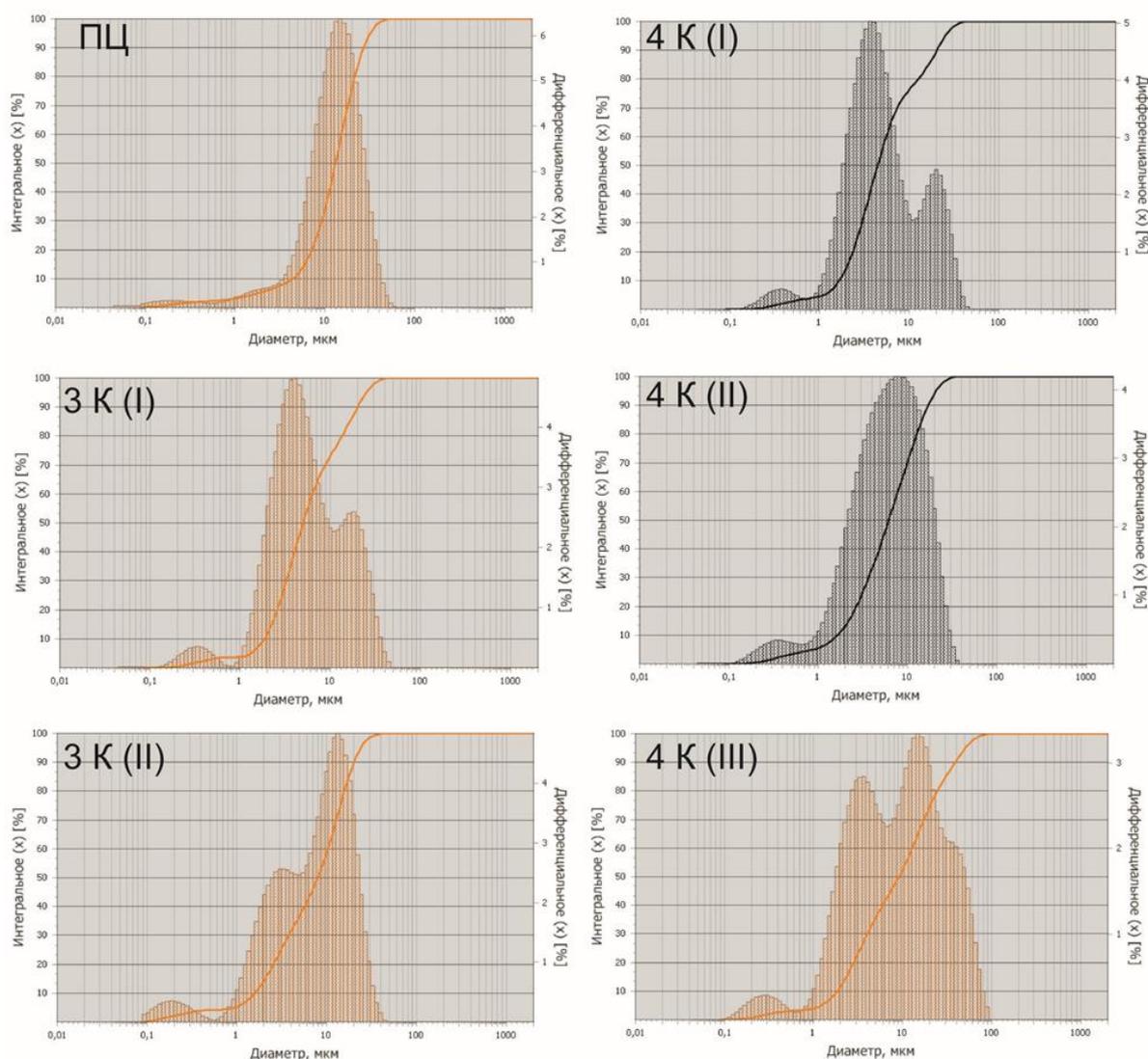


Рисунок 3 – Фракционный состав используемого портландцемента и синтезированных СФК

Измельченные составы СФК имеют полимодальное распределение с четким выделением фракции частиц от 0,1 до 1 мкм. Так, для трехкомпонентных составов и составов 4 К (I) и 4 К (III) помимо ранее указанного диапазона распределения присутствуют еще два ярко выраженных пика, а для 4 К (II) – один. Средние распределения размеров частиц для СФК следующие: 3 К (I) – от 3 до 50 мкм; 3 К (II) – от 1 до 45 мкм; 4 К (I) – от 1 до 35 мкм; 4 К (II) – от 0,9 до 50 мкм и 4 К (III) – от 1 до 100 мкм. Все полученные кривые могут быть описаны законами распределения Розина–Рамлера и А.Н. Колмогорова. Согласно работе [11] системы, обладающие полимодальным распределением частиц, имеют улучшенные характеристики по сравнению с вязущими системами, в которых мономодальное распределение. Объяснением этому является более плотная упаковка полимодальных систем и, как следствие, большее число контактов между частицами.

Полученные распределения размеров частиц представлены на рисунке 3.

Фракционный состав используемого портландцемента представляет собой полифракционное мономодальное распределение частиц, в котором наибольшее количество занимают частицы от 7,5 до 75 мкм.

Исследование тепловыделения при гидратации портландцемента и всех составов СФК осуществляли на приборе ToniCAL Trio в течение 7 суток (рисунок 4). Из представленного рисунка видно, что наибольшее количество теплоты выделилось в начальные сроки для портландцемента. Наибольшее дифференциальное изменение количества теплоты среди СФК наблюдаются у составов 4 К (I) и 3 К (I), имеющих пики начала твердения с 40 часа после затворения для 4 К (I) и с 48 часа после затворения для 3 К (I). Составы 3 К (II) и 4 К (III) имеют наибольшее дифференциальное изменение теплоты в начальные сроки. Состав 4 К (II) обладает наименьшим тепловым эффектом по сравнению с остальными составами. Исходя из полученных данных тепловыделения и литературных сведений [12], можно заключить, что составы 4 К (I) и 3 К (I) будут иметь наибольшую гидравлическую активность по сравнению с другими составами, но

основная часть гидратации будет проходить после 40 часов твердения, т.е. после формирования каркаса цементного камня, что может привести к его деструкции. Следовательно, целесообразно использовать эти составы СФК (с приведенными значениями удельной поверхности, гранулометрического состава и минералогического состава) в качестве уплотняющего цементный камень компонента.

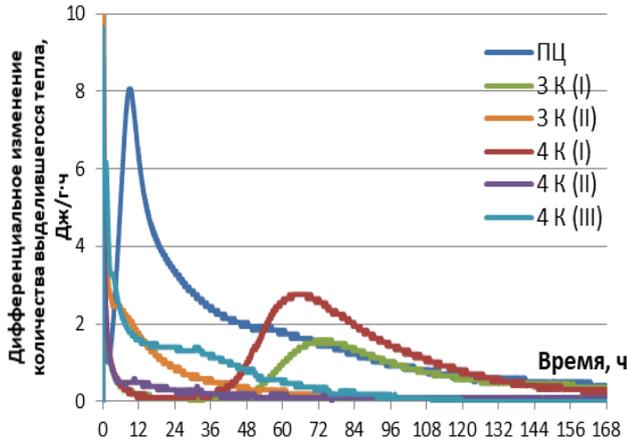


Рисунок 4 – Изменение количества выделившегося в процессе гидратации тепла

Смешанные цементы составляли путем усреднения портландцемента и СФК в разном процентном содержании. Для исследования были выбраны следующие концентрации СФК: 1, 2, 4, 6, 8 и 10 %. Усреднение производили в фарфоровой мельнице в течение 6 часов, в которой в качестве тел усреднения использовались резиновые пробки, что исключало возможность нарушения фракционного состава композиционных вяжущих. Формование образцов проводили в формах для малых образцов: образцы-балочки с размерами 1,0x1,0x6,0 см и образцы-кубики с размерами 1,41x1,41x1,41 см. Водоцементное отношение для всех композиционных вяжущих составляло 26,67 %. Первые сутки твердения выдерживали образцы в климатическом шкафу с влажностью среды порядка 90 %. После твердения и набора начальной прочности формы расформовывались и образцы извлекались. Для изучения линейного расширения использовались образцы-балочки с выше приведенными размерами, начальные параметры которых измерялись при помощи прибора для измерения линейного расширения с индикатором цифрового типа, позволяющего регистрировать изменение размеров с точностью до 0,001 мм. Замеры линейного расширения проводились в возрастах 2, 3, 4, 5, 7, 10, 12, 14, 17, 20, 22, 24, и 28 сут. Результаты изменения линейного расширения композиционных составов представлены на рисунке 5.

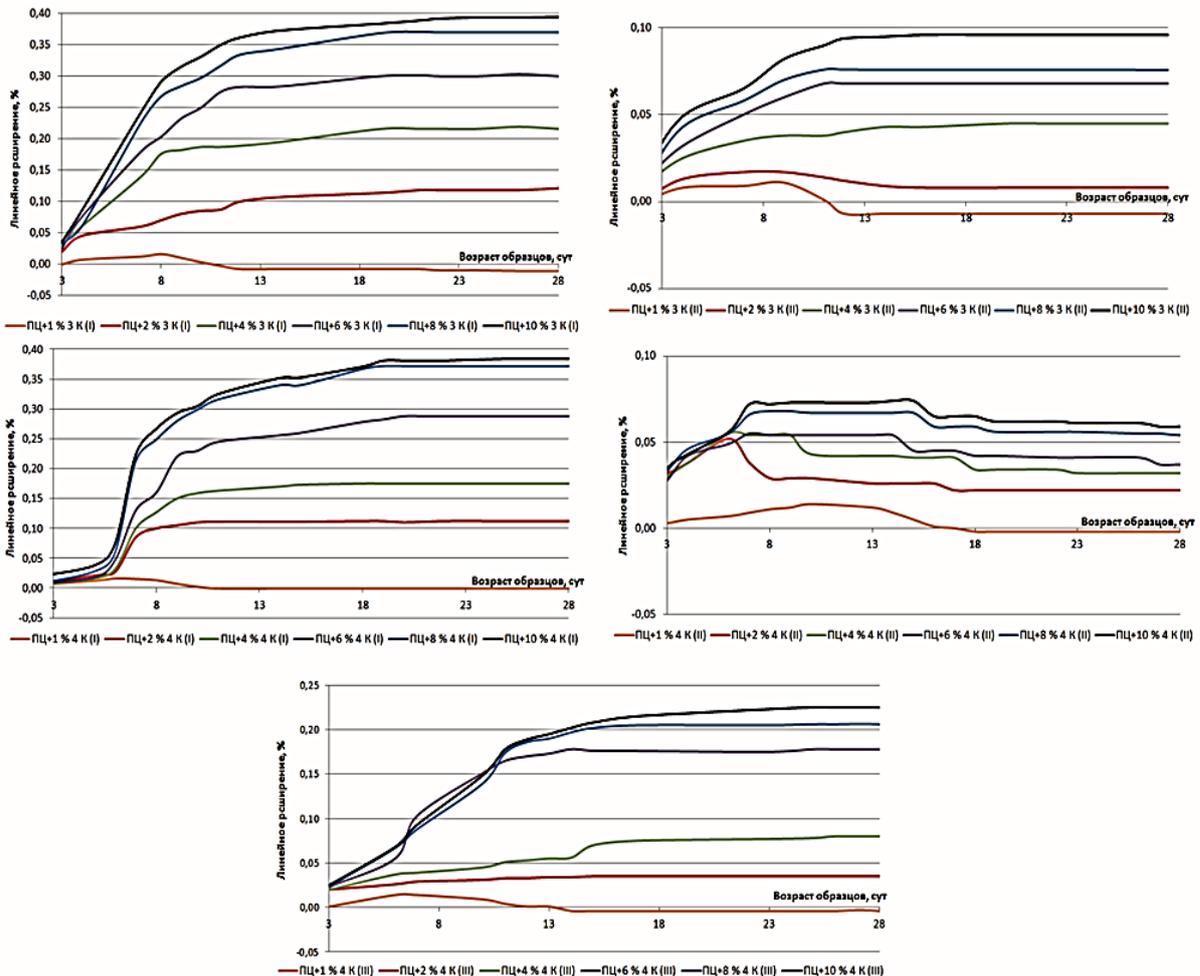


Рисунок 5 – Изменение линейного расширения образцов-балочек композиционного цемента

Все составы композиционных с цементов с концентрацией выше 1 % СФК показали увеличение линейных размеров. Наиболее интенсивно происходило изменение размеров при использовании СФК 3 К (I) и 4 К (I), для которых к 8-ми суточному возрасту увеличение линейного расширения уже составлял более 70 % от максимального для этих составов. При использовании 4 К (III) к 8-ми суткам прирост составлял около 50 % от максимального значения. Состав смешанного цемента, в котором использовалась добавка 3 К (II) значительно отличается по показателю линейного расширения (более чем в 2 раза) от схожего по минералогии состава 4 К (III). Столь высокое различие может быть вызвано разницей в процессе синтеза. Составы с использованием 4 К (II) после увеличения своих линейных размеров в течение 17

суток испытывают незначительную усадку к 20 суткам, после чего линейные размеры образцов остаются постоянными. Композиционные составы с добавлением 1 % СФК в начальные сроки незначительно увеличивают свои размеры, что связано с «набуханием» цементного камня в следствии значительного прироста коллоидной массы, после чего происходит кристаллизация гидратных минералов и цементный камень уплотняется. Расширяющейся добавки в количестве 1 % видимо недостаточно для получения безусадочной композиции.

Оценку гидравлической активности полученных композиционных вяжущих материалов производили по испытанию на изгиб и сжатие цементного камня в возрасте 2, 7 и 28 сут. Результаты испытаний образцов на изгиб и сжатие представлены в таблице 2.

**Таблица 2 Прочностные показатели композиционных вяжущих**

Наименование		Прочность при сжатии/изгибе в возрасте, МПа/сут		
		2	7	28
ПЦ+2 % СФК	3 К (I)	35,64 / 8,67	48,89 / 11,25	72,25 / 13,35
	3 К (II)	28,36 / 7,38	58,11 / 6,73	75,62 / 15,70
	4 К (I)	37,51 / 5,17	62,90 / 11,39	78,05 / 16,09
	4 К (II)	36,65 / 4,86	49,75 / 13,32	69,84 / 10,28
	4 К (III)	35,84 / 6,14	51,74 / 13,66	70,64 / 14,32
ПЦ+4 % СФК	3 К (I)	50,16 / 10,75	66,41 / 13,55	77,39 / 14,81
	3 К (II)	39,19 / 7,50	50,16 / 7,61	60,25 / 15,48
	4 К (I)	49,98 / 12,21	65,89 / 13,07	82,13 / 17,18
	4 К (II)	38,40 / 7,45	63,77 / 9,37	64,40 / 9,97
	4 К (III)	39,67 / 9,53	62,56 / 13,61	69,07 / 14,48
ПЦ+6 % СФК	3 К (I)	43,04 / 14,19	68,89 / 13,08	76,16 / 14,45
	3 К (II)	32,27 / 7,65	59,26 / 11,77	64,70 / 16,08
	4 К (I)	43,44 / 7,99	74,02 / 10,39	79,89 / 15,68
	4 К (II)	33,25 / 7,96	65,09 / 14,57	60,00 / 12,00
	4 К (III)	34,84 / 7,85	59,84 / 11,02	69,49 / 14,95
ПЦ+8 % СФК	3 К (I)	38,14 / 14,50	46,72 / 10,35	59,01 / 13,49
	3 К (II)	32,42 / 8,76	50,95 / 8,55	62,83 / 13,55
	4 К (I)	35,68 / 6,27	54,51 / 8,15	67,42 / 14,06
	4 К (II)	40,69 / 6,17	67,97 / 10,12	53,83 / 7,85
	4 К (III)	36,33 / 7,98	51,32 / 10,96	62,04 / 10,27
ПЦ+10 % СФК	3 К (I)	39,39 / 6,42	52,10 / 9,55	54,205 / 6,494
	3 К (II)	42,14 / 6,97	46,95 / 11,75	56,28 / 9,94
	4 К (I)	41,99 / 8,13	55,28 / 12,65	54,01 / 5,06
	4 К (II)	45,65 / 9,24	68,66 / 13,87	53,33 / 12,06
	4 К (III)	44,72 / 5,29	64,41 / 10,32	59,55 / 11,87

Наибольшие прочностные показатели имеют композиционные составы, в которых в качестве второго компонента использовались 3 К (I), 4 К (I) и 4 К (II), количество которых было ограничено 4 %. Для составов 3 К (II) и 4 К (III) предельная концентрация ограничена 6 %. Выше упомянутых концентраций наблюдается спад прочности, что связано с избытком появляющихся дефектов в матрице цементного камня и, как следствие,

его деструкции.

С целью изучения состава гидратных фаз смешанных цементов был проведен рентгенофазовый анализ образцов, показавших наибольшие прочности и линейное расширение в возрасте 28 суток. Рентгенограммы образцов смешанных цементов представлены на рисунке 6.

В начальные сроки твердения продукты гидратации

представлены преимущественно портландитом  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , этtringитом  $\text{C}_3\text{A}\cdot 3\text{CS}\cdot \text{H}_{32}$  и низкоосновными гидросиликатами кальция  $\text{C}_x\text{S}_y\text{H}_z$  (тоберморит и др.). Гидратированные фазы СФК в ранние сроки не наблюдаются. В возрасте 7 суток на рентгенограммах можно обнаружить пики трехсульфатной формы гидроферрита кальция  $\text{C}_3\text{F}\cdot 3\text{CS}\cdot \text{H}_{32}$ . У всех составов к возрасту 28 суток увеличивается интенсивность пиков  $\text{C}_3\text{F}\cdot 3\text{CS}\cdot \text{H}_{32}$  в связи с увеличением количества продуктов гидратации двухкальциевого сульфогеррита

и кристаллизацией уже образовавшегося железистого этtringита, а также происходит переход низкоосновных форм гидросиликатов кальция в высокоосновные (гиллебрандит и др.). Помимо сульфатной формы гидроферритов кальция, наблюдается также и бессульфатная форма, пики которой становятся заметными только к 28 суточному возрасту, что свидетельствует о незначительном количестве образовавшихся гидроферритов кальция и их медленной кристаллизации.

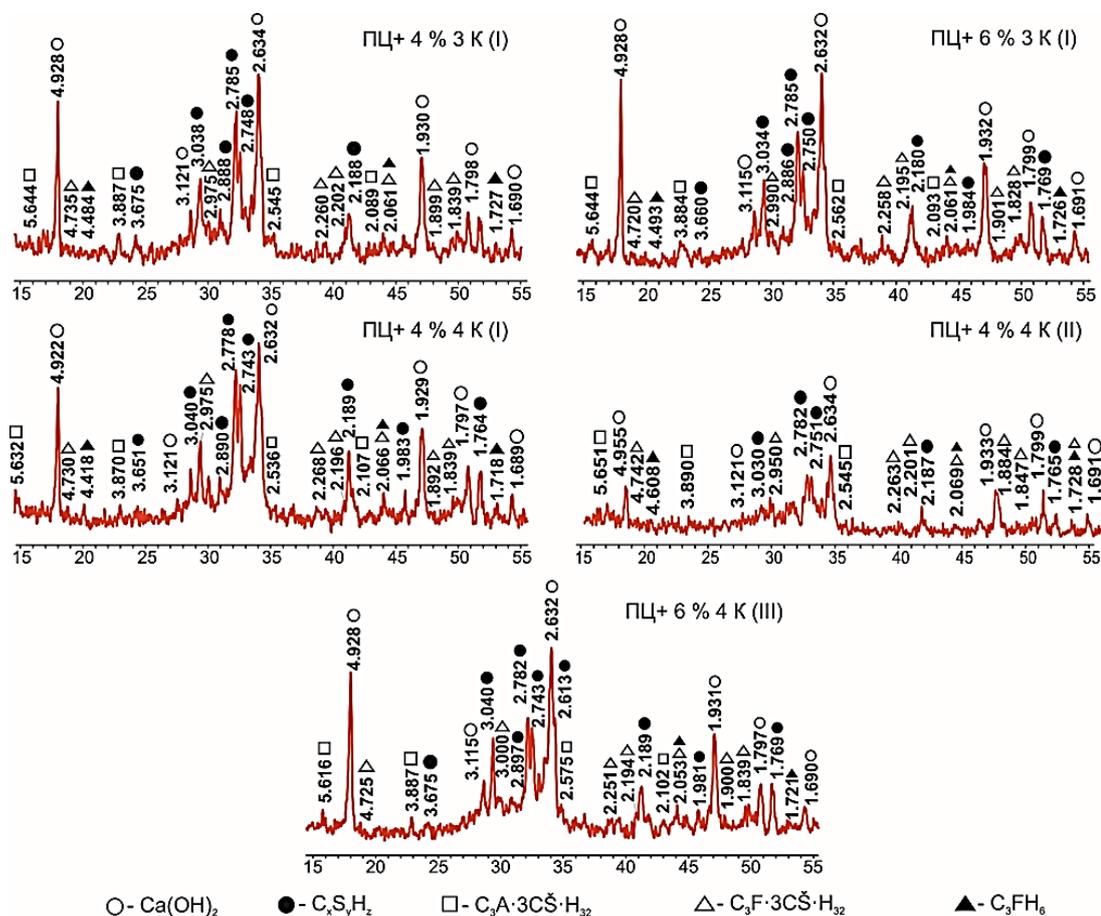


Рисунок 6 - Рентгенограммы образцов композиционных цементов в 28 суточном возрасте

#### Выводы:

- Согласно определений гранулометрического состава портландцемента и синтезированных СФК, отмечено, что наиболее плотные структуры получаются при использовании всех СФК с полимодальным распределением частиц. СФК 4 К (II) имеет мономодальное распределение частиц, что не обеспечивает плотную матрицу цементного камня ввиду «излишних» пустот между частицами.
- Результаты тепловыделения при гидратации портландцемента и СФК показывают, что ввод всех синтезированных СФК должен осуществляться в определенных пределах. В СФК 3 К (I) и 4 К (I) основной этап гидратации происходит только после 40 часов от момента затворения, в то время как основная часть гидратации портландцемента приходится на первые 10 часов твердения. У составов 3 К (II) и 4 К (III) основной период гидратации приходится на первые 48 часов твердения. Количество ввода 3 К (II) и 4 К (III) ограничивается не только временем гидратации фазы сульфогерритов кальция, но и количеством

присутствующего в их составе белита, поскольку он не способен обеспечить набор прочности в начальные этапы твердения.

- Результаты определения линейного расширения и прочности при изгибе и сжатии показывают, что они находятся в прямой зависимости от количества фазы сульфогерритов кальция для всех видов синтезированных СФК, а также присутствующего  $\text{C}_2\text{S}$  для 3 К (II), 4 К (II) и 4 К (III). При увеличении линейного расширения прочность цементного камня сначала растет, ввиду уплотнения структуры, а затем падает из-за появившихся внутренних напряжений.

- Прочность и линейное расширение смешанных цементов на ранних сроках твердения не зависят от сульфогерритного компонента, а зависят от появляющихся в первую очередь после взаимодействия с водой коллоидного геля (из-за которого происходит незначительное «набухание» цементного камня), фаз портландита, низкоосновных гидросиликатов кальция и этtringита. Согласно РФА к возрасту 7 суток на рентгенограммах появляются пики фаз

гидросульфогерритов кальция, которые обеспечивают уплотнение цементного камня и его линейное расширение. К 28 суткам интенсивность пиков гидратных фаз СФК возрастает, что свидетельствует

как об увеличении количества прореагировавшего  $C_2F \cdot C\hat{S}$ , так и об кристаллизации уже имеющихся фаз  $C_3F \cdot 3C\hat{S} \cdot H_{32}$  и  $C_3F \cdot H_6$ .

Литература:

1. Жарко В.И. Использование отходов в цементной промышленности России. / Цемент и его применение, 2009. – №4. – С. 41-45
2. Классен В.К., Борисов И.Н., Мануйлов В.Е. Техногенные материалы в производстве цемента: монография / под общей редакцией В.К. Классена. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2008. – 126 с.
3. Уфимцева В.М., Капустин Ф.Л., Пьячев В.А. Проблемы использования техногенного сырья в производстве цемента. / Цемент и его применение, 2009. – №6. – С. 86-90
4. Андреев В.В., Касьянов Г.Н. Цементы с высокой энергией самонапряжения на основе побочных продуктов промышленности. / Цемент и его применение, 2000. – № 2. – С. 46-47.
5. Мандрикова О.С. Синтез сульфогерритного клинкера с использованием техногенных материалов для получения специальных цементов: дис. ... канд. техн. наук. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2013. – 141 с.
6. Осокин А.П., Кривобородов Ю.Р., Потапова Е.Н. Модифицированный портландцемент. – М.: Стройиздат, 1993. – 328 с.
7. Гребенюк А.А., Борисов И.Н. Повышение качества сульфогерритного клинкера на основе техногенных отходов. / Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова, 2016. – № 11. – С. 177-184.
8. Гребенюк А.А., Борисов И.Н. Снижение количества образующихся промежуточных соединений при синтезе сульфогерритного клинкера. / Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова, 2016. – № 12. С. – 188-194.
9. Кривобородов Ю.Р. Сульфатированные тампонажные цементы: дис. ... д-ра техн. наук. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2001. – 358 с.
10. Осокин А.П., Этин З.Б., Пушкарев И.С. Технология получения и свойства особокоррозионностойкого цемента. / Цемент и его применение, 2001. – № 6. – С. 17-19.
11. Гранулометрический состав как критерий регулирования свойств дисперсных систем / Петропавловская В.Б., Новиченкова Т.Б., Белов В.В. и др. // Строительные материалы, 2013. – № 1. – С. 64–65.
12. Ушеров-Маршак А.В. Калориметрия цемента и бетона. – Харьков: Факт. 2002. – 183 с.

References:

1. Zharko V.I. Ispol'zovanie othodov v cementnoj promyshlennosti Rossii [The use of wastes in the cement industry in Russia] *Cement i ego primeneniye*, 2009. – №4. – pp. 41-45. (in Russian).

2. Klassen V.K., Borisov I.N., Manuilov V.E. *Tehnogennye materialy v proizvodstve cementa: monografija/ pod obshhej redakciej V.K. Klassena* [Production induced materials in cement production: monograph / edited by V.K. Klassen] Belgorod: Publisher BSTU. 2008. – 126 p. (in Russian).
3. Ufimtseva V.M., Kapustina F.L., Pyachev V.A. Problemy ispol'zovaniya tehnogennogo syr'ja v proizvodstve cementa [Production induced usage problems in cement production] *Cement i ego primeneniye*, 2009. – №6 – pp. 86-90. (in Russian).
4. Andreev V.V., Kasiyanov G.N. [High autostressing of energy cement on basis of by-products] *Cement i ego primeneniye*. – 2000, № 2. – pp. 46-47. (in Russian).
5. Mandrikova O.S. *Sintez sul'foferritnogo klinkera s ispol'zovaniem tehnogennykh materialov dlja poluchenija special'nykh cementov: dis. ... kand. tehn. nauk* [Sulfoferrite clinker synthesis with production induced materials usage to get special cement: dis. ... PhD] – Belgorod: Publisher BSTU, 2013. – 141 p. (in Russian).
6. Osokin A.P., Krivoborodov U.R., Potapova E.N. *Modificirovannyj portlandcement* [Modified Portland cement] М.: Strojizdat, 1993. – 328 p. (in Russian).
7. Grebeniuk A.A. Borisov I.N. *Povyshenie kachestva sul'foferritnogo klinkera na osnove tehnogennykh othodov* [Increase of the sulfoferrite clinker quality on basis of technogenic waste] *Vestnik BGTU im. V.G. Shuhova*, 2016. – № 11. – pp. 177-184. (in Russian).
8. Grebeniuk A.A. Borisov I.N. [Lowering of the quality of produced intermediate compounds in the synthesis of the sulfoferrite clinker] *Vestnik BGTU im. V.G. Shuhova*. – 2016, № 12. – pp. 188-194. (in Russian).
9. Krivoborodov U.R. *Sulfatirovannyye tamponazhnye cementy: dis. ... d-ra tehn. nauk* [Sulfoferrite oil-well cement: Diss. ... doctor of Techn.Sci] М.: D.Mendelev University of Chemical Technology of Russia, 2001. – 358 p. (in Russian).
10. Osokin A.P., Entin Z.B., Pushkeryev I.S. *Tehnologija poluchenija i svoystva osobokorroziionnostojkogo cementa* [Production technology and peculiarities of extra corrosion-resistant cement] *Tsement I yego primeneniye*, 2001. – № 6. – pp. 17-19. (in Russian).
11. Petropavlovskaya V.B., Novichenkova T.B., Belov V.V., Buryanov A.F. *Granulometricheskij sostav kak kriterij regulirovaniya svoystv dispersnykh sistem* [Granulometric composition as criteria of adjusting of disperse system peculiarities] *Stroitelniye materialy*, 2013. – № 1. – pp. 64–65. (in Russian).
12. Usherov-Marshak A.V. *Kalorimetriya cementa i betona* [Cement and concrete calorimetry] Kharkov: Fact, 2002. – 183 p. (in Russian).

**Борисов Иван Николаевич** - доктор технических наук, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г.Шухова», заведующий кафедрой «Технологии цемента и композиционных материалов», **E-mail:** [borisov@intbel.ru](mailto:borisov@intbel.ru)

**Гребенюк Александр Александрович** – аспирант ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г.Шухова», кафедра «Технологии цемента и композиционных материалов», **E-mail:** [alexander.grebeniuk@mail.ru](mailto:alexander.grebeniuk@mail.ru)