

УДК 666.974

РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ТЕРМОСТОЙКОСТИ САМОЗАТВЕРДЕВАЮЩЕГО ШЛАКОЩЕЛОЧНОГО ГАЗОБЕТОНА

Евтушенко Сергей Иванович

Профессор, д.т.н., почетный работник высшего образования Российской Федерации, советник РААСН, член РОМГГиФ, профессор кафедры «Информационные системы, технология и автоматизация строительства», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (г. Москва); e-mail: evtushenkosi@mgsu.ru

Скибин Геннадий Михайлович

Профессор, д.т.н., член Российского общества по Механике Грунтов, Геотехнике и Фундаментостроению (РОМГГиФ), заведующий кафедрой «Промышленное, гражданское строительство, геотехника и фундаментостроение» Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия; e-mail: skibingm@mail.ru

Авакян Арсен Гайкович

Доцент, к.т.н., доцент кафедры «Промышленное, гражданское строительство, геотехника и фундаментостроение» Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия; e-mail: avakjan_arsen@mail.ru

Проценко Кирилл Денисович

Аспирант кафедры «Промышленное, гражданское строительство, геотехника и фундаментостроение» Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия; e-mail: kirill.procenko98@gmail.com

Аннотация: Работа посвящена разработке быстротвердеющего в результате термической реакции жаростойкого газобетона повышенной термостойкости с температурой применения до 550°C для проведения изоляционных и ремонтных работ в монолитном и сборном исполнении.

Ключевые слова: быстротвердеющий жаростойкий шлакощелочной газобетон, золошлаковые отходы, термостойкость, диспергидратор

DEVELOPMENT OF MEASURES TO IMPROVE THE HEAT RESISTANCE OF SELF-HARDENING SLAG-ALKALINE AERATED CONCRETE

Evtushenko Sergey Ivanovich

Professor, Doctor of Technical Sciences, Honorary Worker of Higher Education of the Russian Federation, Adviser to the RAACS, Member of the RSSMGFE, Professor of the Department "Information Systems, Technology and Automation of Construction", National Research Moscow State University of Civil Engineering (Moscow); e-mail: evtushenkosi@mgsu.ru

Skibin Gennady Mikhailovich

Professor, Doctor of Technical Sciences, member of the Russian Society for Soil Mechanics, Geotechnics and Foundation Engineering (RSSMGFE), Head of the Department "Industrial, Civil Engineering, Geotechnics and Foundation Engineering" of the M.I. Platov South Russian State Polytechnic University (NPI), Novochoerkassk, Russia; e-mail: skibingm@mail.ru

Avakyan Arsen Gaikovich

Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial, Civil Engineering, Geotechnics and Foundation Engineering of the M.I. Platov South Russian State Polytechnic University (NPI), Novochoerkassk, Russia; e-mail: avakjan_arsen@mail.ru

Protsenko Kirill Denisovich

Postgraduate student of the Department of Industrial, Civil Engineering, Geotechnics and Foundation Engineering of the M.I. Platov South Russian State Polytechnic University (NPI), Novochoerkassk, Russia; e-mail: kirill.procenko98@gmail.com

Abstract: The work is devoted to the development of heat-resistant aerated concrete of increased heat resistance, which hardens quickly as a result of a thermal reaction, with an application temperature of up to 550 ° C for insulation and repair work in monolithic and prefabricated versions.

Keywords: fast-hardening heat-resistant slag-alkaline aerated concrete, ash and slag waste, heat resistance, dispersant

1. Введение

На первом этапе разработки быстротвердеющего жаростойкого шлакощелочного газобетона был проведен подбор составов шлакощелочных вяжущих, определены оптимальная плотность и модуль жидкого стекла, подобраны соотношения молотого гранулированного шлака и золы-уноса, определен расход жидкого стекла, выбран газообразователь для самозатвердевающей шлакощелочной смеси [1-2].

Следующим этапом работы является разработка мероприятий по повышению термостойкости газобетона. С этой целью в состав оптимизированного газобетона вводят золошлаковые отходы фракции 0-5 мм с добавками сажи в соотношении 10:1, что приводит к резкому увеличению термостойкости, которая составила 131 или 15 водных теплосмен для плотности 600 кг/м³. Повышенная термостойкость поризованного бетона (табл.2) объясняется тем, что мелкозернистые составляющие – зола-уноса и сажа в результате выгорания несгоревших угольных частиц и углеродных частиц образуют микротрещиноватую структуру, типа «гармошки», которая

частично компенсирует неравномерность термического расширения компонентов бетона, а также тем, что уголь в составе золы-уноса и углерод в составе сажи присутствуют в качестве компонента газобетона в наиболее ответственный период формирования его структуры до 545 °С [3-7].

1. Подбор оптимального соотношения компонентов

Подбор состава полученного поризованного бетона проводился методами планирования эксперимента. С этой целью выбран наиболее простой, не требующий дополнительной математической подготовки, но достаточно надежный метод планирования эксперимента.

Предварительные исследования показали, что шлакощелочной газобетон плотностью 600 кг/м³ по параметрам прочности, теплопроводности и долговечности соответствует требованиям, предъявляемым к теплоизоляционным материалам для изоляции паропроводов на Новочеркасской ГРЭС, в связи с этим, была поставлена задача оптимизировать составы газобетона плотностью 600 кг/м³ с доверительной вероятностью 95 % с учетом достижения максимальной термостойкости или долговечности.

Сущность планирования экспериментов и выбора состава бетонов с применением математико-статистических методов заключается в установлении математической зависимости между заданной плотностью газобетона и расходом составляющих компонентов. Получаемая математическая зависимость используется для назначения и поиска оптимальных составов.

Метод подбора состава газобетона состоит из двух этапов. На первом этапе составляется регрессивное уравнение. На втором этапе находят оптимальное соотношение компонентов.

2. Математико-статистические методы в установлении математической зависимости между заданной плотностью газобетона и расходом составляющих компонентов

В качестве варьируемых факторов приняты следующие материалы:

X_1 – расход жидкого стекла, кг/м³;

X_2 – расход доменного шлак+зола-уноса Нч ГРЭС, взятых в соотношении 2 : 1 , кг/м³;

X_3 – расход золошлаковых отходов фракции 0 – 5 мм Нч ГРЭС + технический углерод, в соотношении 10 : 1, кг/м³;

X_4 – расход пергидроля, кг/м³.

Выбранные факторы отвечают требованиям независимости, совместимости и имеют области определения.

После выбора факторов, включаемых в исследование, для каждого из них определен размах варьирования и число уровней.

Величина размаха варьирования (интервала варьирования) фактора ограничиваются с одной стороны – областью определения фактора с учётом принципиальных или технических ограничений, а с другой стороны – величиной ошибки измерения значений данного фактора. Если размах варьирования будет соизмерим с величиной ошибки измерения данного фактора, то два соседних уровня будут практически неразличимы.

При планировании эксперимента факторы X_i из натуральных переменных переводятся в кодированные X_i - безразмерные величины, обычно с ограничением: $-1 \leq X_i \leq +1$. Операция кодирования фактора представляет собой переход к другой шкале измерения фактора (табл.1).

В кодированных переменных основной уровень фактора принимается за «0», нижний уровень - за «-1», а верхний уровень за «+1».

Таблица 1.

Уровни варьируемых факторов

Код	Значение кода	Значение факторов			
		X_1 , кг	X_2 , кг	X_3 , кг	X_4 , л
Основной уровень	0	184	184	184	17,28
Интервал варьирования	ΔX_i	36,8	36,8	36,8	3,456
Верхний уровень	+	202,4	202,4	202,4	19,008
Нижний уровень	-	165,6	165,6	165,6	15,552

При выполнении замесов опыты разбиваются на группы таким образом, чтобы опыты в нулевой точке были распределены между остальными. Принят

следующий порядок опытов для реализации плана:
1,2,3,4,7,5,6,7,8,18,9,10,11,12,19,13,14,15,16,20.

На основании полученных составов бетона, была изготовлена серия по три образца для определения прочности образцы при сжатии на 1 сутки, 28 суток, теплопроводности, термостойкости для определения в воздушных и водных теплосменах. В таблице 2 приведены средние значения из двух наибольших значений

Таблица 2.

Физико-химические и жаростойкие характеристики шлакощечного газобетона плотностью 600 кг/м³

Жидкое стекло, кг/м ³	Молотый доменный шлак/зола-уноса (2 : 1), кг/м ³	Золошлаковые отходы фр. 0 – 5 мм/технический углерод (10 : 1), кг/м ³	Пергидроль, кг/м ³	Плотность, кг/м ³	Прочность при сжатии, Мпа		Теплопроводность, Вт/м ² •°С	Воздушные т. с. / Водные т. с.	Наличие трещин
					1 сут.	28 сут.			
2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\frac{205,17}{32,80}$	$\frac{200,78}{32,10}$	$\frac{198,50}{32,74}$	$\frac{22,38}{2,36}$	625	2,68	3,75	0,142	$\frac{131}{15}$	нет

Для оценки достоверности результатов мысленных опытов изготавливаем 3 образца газобетона. По результатам испытаний серии образцов получены следующие значения прочности на сжатие:

- образец 1, $\rho = 602,00$ кг/м³;
- образец 2, $\rho = 601,27$ кг/м³; Средняя плотность по 2-м наименьшим
- образец 3, $\rho = 599,43$ кг/м³. значениям $\rho_{ср.} = (599,43 + 601,27)/2 = 600,35$ кг/м³.

Результаты прочности находятся в пределах одной сигма равной 2,57, что в пределах доверительной вероятности 0,95[8-10].

По результатам исследований получен патент № 2777325 С1[11].

3. Разработка диспергидратора

Смещение в смешанной ячеистой бетонной смеси происходит вдоль плоскости скольжения, которая захватывает очень небольшой объем

материала, а несмешивающиеся блоки смеси находятся между этими плоскостями. По мере увеличения скорости и продолжительности перемешивания объем этих блоков уменьшается, но очень сложно полностью устранить их. В то же время основные трещины, образующиеся при разрушении изделий из ячеистого бетона, обязательно выберут путь с наименьшим сопротивлением и перейдут от одного блока с неоптимальной структурой к другому. В результате несущая способность изделия будет занижена.

Для оптимального перемешивания смеси нужен небольшого объема энергонасыщенный проточный смеситель, который придаст индивидуальные импульсы ускорения зернам этой смеси. В смесителях больших объемах периодического действия достичь гомогенизации смеси практически невозможно. Кроме того, перемешивание должно происходить в течение 3 минут до начала термической реакции для предотвращения «козлования» смеси внутри смесителя [12].

Для решения данной проблемы в Южно-Российском государственном политехническом университете имени М.И.Платова (НПИ) на кафедре «Промышленное, гражданское строительство, геотехника и фундаментостроение» был разработан смеситель - диспергидратор для газобетонной смеси.

Смеситель включает смесительную емкость, приводной вал и перемешивающий рабочий орган с полыми лопастями. Перемешивающий рабочий орган выполнен в виде вала смесителя, установленного без возможности проворота, но с возможностью съема на приводном валу. К валу смесителя на определенном расстоянии друг от друга прикреплены расположенные рядами в виде гребенки лопасти. Наружная поверхность лопасти представляет собой в сечении скобообразный профиль для захвата раствора. На внутренней поверхности емкости по периметру под углом 45° установлены отбойники (рис. 1).

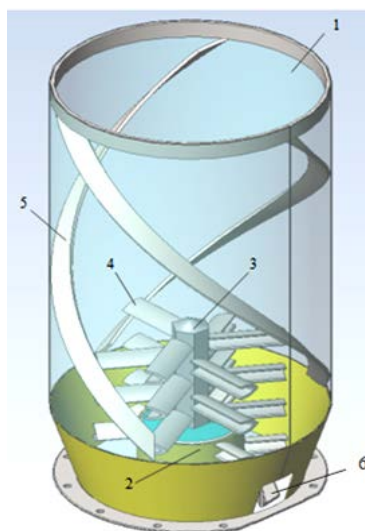


Рис. 1. Диспергидратор. 1- смесительная емкость; 2- приводной вал; 3- вал; 4- лопасти; 5- отбойник; 6 – патрубок для истечения газобетонной смеси

Раствор, увлекаемый центробежной силой и касательным ускорением, которое создают при вращении со скоростью 150 об/мин лопасти, представляющие, с наружной поверхности, скобообразный профиль, разгоняется до оптимальной для смешения материала скорости, при которой происходит разрушение плохо перемешанных блоков в момент соприкосновения с отбойником. Отбитая смесь отбрасывается в центральную часть перемешивающей емкости, захватывается лопастями и процесс диспергации диспергации - гидратации повторяется [13].

4. Исследование фазового состава и структуры газобетонного камня методом качественного рентгенофазного анализа (РФА) и дифференциального термического анализа (ДТА).

Основным фактором долговечности футеровочных материалов является высокая термостокость. Как физико – механические, так и термостойкие характеристики зависят от фазового состава и структуры затвердевшего цементного камня. Структура цементного камня определяется составом гидратных фаз, размером и свойствами кристаллов, характером их контактов, особенностями и величиной пористости. Для жаростойкого бетона структура цементного камня должна быть сложена стабильными высокодисперсными гидратными фазами, образующимися при твердении вяжущих без

промежуточных фаз и перекристаллизаций, плавно дегидратирующими при нагревании в широком диапазоне температур с небольшими изменениями в объеме и массе и минералами.

При твердении шлакощелочных вяжущих в основном образуются низкоосновные гелеобразные силикаты кальция $C - S - H$, а также щелочные гидроалюмосиликаты – цеолиты. Наиболее предпочтительной, с точки зрения формирования однородной, стабильной в условиях нагревания структуры, является терморитовый гель, имеющий близкой к аморфной мелкодисперсную плотную структуру. Такой гидросиликатный гель имеет способность лишь к незначительному изоморфизму, когда часть кремнекислотных тетраэдров в структуре $[SiO_4]^{4-}$ заменяется на алюмокислородные $[AlO_4]^{5-}$ с образованием «аномального» или Al- замещенного тоберморита, характеризующегося наибольшей устойчивостью при повышенных температурах. Степень замещения $[SiO_4]^{4-}$ на $[AlO_4]^{5-}$ достигает 5 %.

Цеолиты – это каркасные водосодержащие алюмосиликаты. Каждый кремнекислородный тетраэдр $[SiO_4]^{4-}$ связан через общие ионы кислорода в трехмерном кислородном каркасе с другими тетраэдрами. Как отмечалось выше кремнекислородные часть кремнекислотных тетраэдров в структуре $[SiO_4]^{4-}$ заменяется на алюмокислородные $[AlO_4]^{5-}$, а возникающий, при этом, дополнительный отрицательный заряд компенсируется внедряющимися в кристаллическую решетку катионами Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} и др. Структура цеолитов отличается сообщаемыми между собой каналами и полостями, заполненными водой и обменными катионами щелочных и щелочноземельных металлов. Вода из структуры цеолитов, при нагревании, удаляется относительно легко, не вызывая нарушения алюмосиликатного каркаса. Этим объясняется высокая термостойкость шлакощелочных бетонов.

Большинство вяжущих при температуре $800^\circ C$ резко теряют прочность. При этой же температуре определяют термостойкость жаростойких бетонов. Однако, в связи с тем, что температура применения проектируемого бетона $550^\circ C$ было принято решение изучать фазовый состав и структуру цементного

камня после естественного твердения, сушки при 105 °С и 600 °С и выдержки при этой температуре 4 часа.

Изучение фазового состава и структуры цементного камня проводили методом качественного рентгенофазного анализа (РФА), дифференциального термического анализа (ДТА).

Предварительно изучали фазовый состав исходного Череповецкого доменного гранулированного шлака и золы-уноса.

В цементном камне, как в образцах естественного твердения, так и после сушки и обжига зафиксировано наличие остаточных шлаковых минералов мервинита, магнезиальной шпинели, магнезиохромита и хромита, периклаза (рис. 2-4).

Исследователями показан термодинамический расчет реакций силикатообразования в системах основной шлак – NaOH:



с вероятным образованием продуктов реакций:

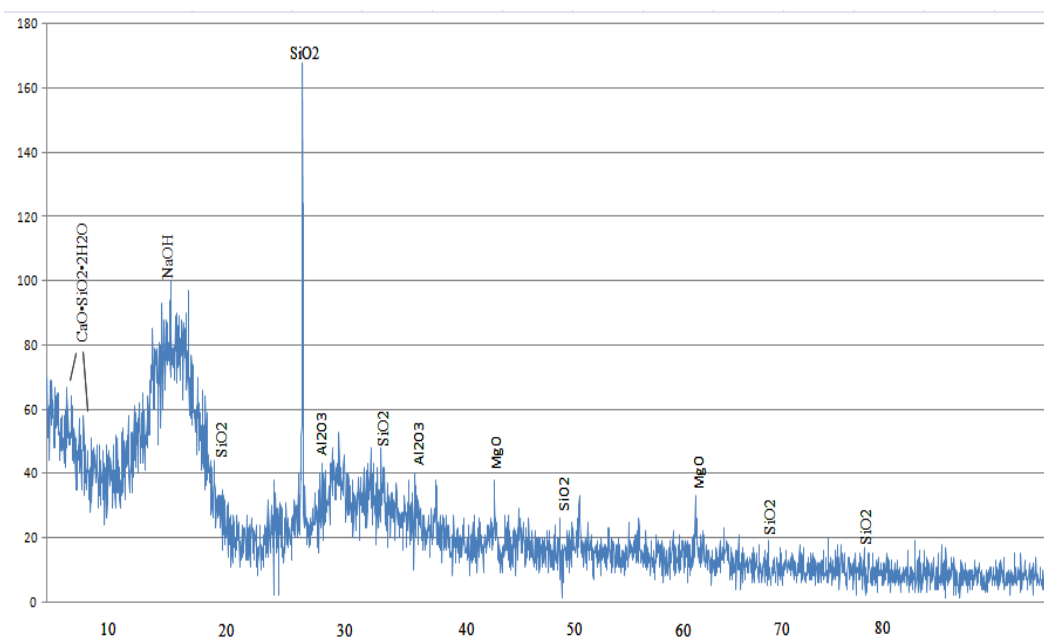
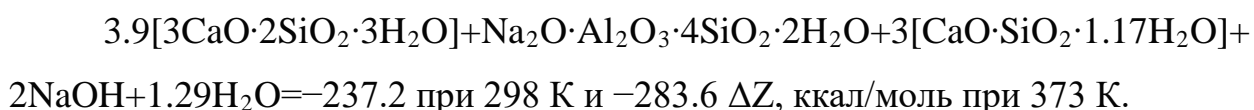
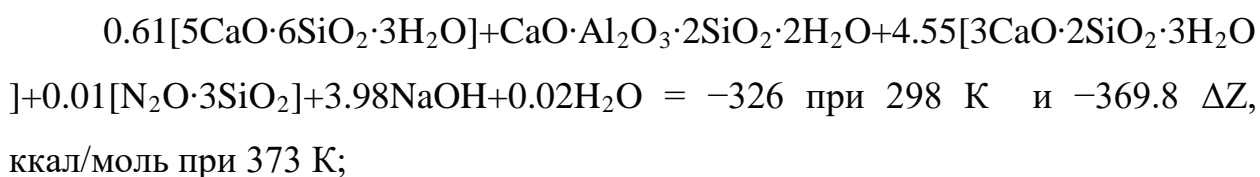


Рис. 2. Фазовый состав цементного камня после естественного твердения

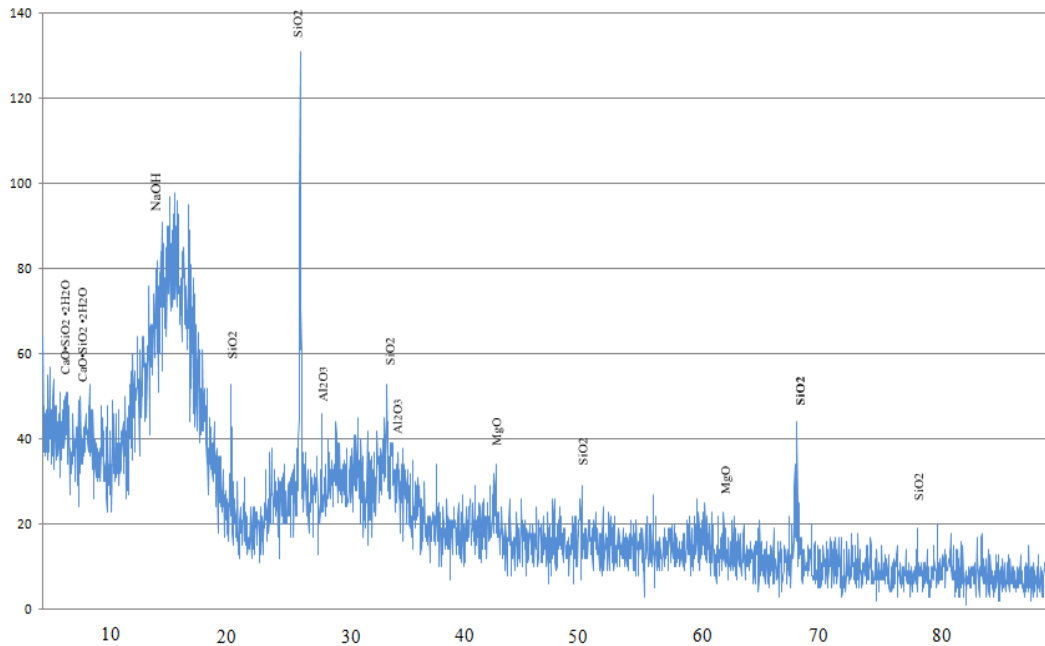


Рис. 3. Фазовый состав цементного камня после сушки при 105 °С

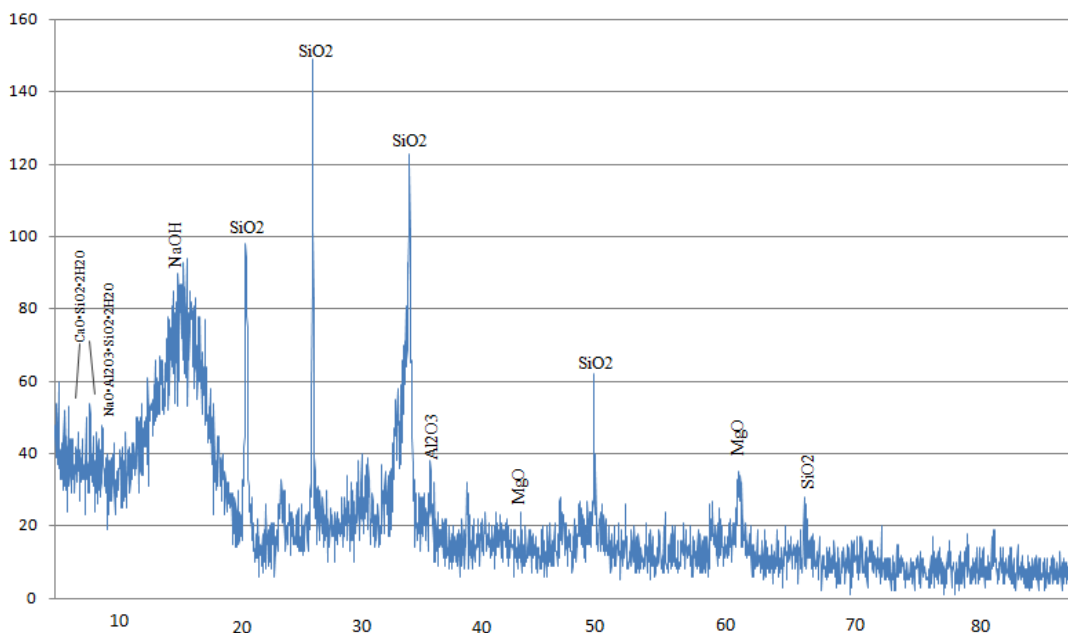


Рис. 4. Фазовый состав цементного камня после сушки при 600 °С

Из новообразований идентифицирован натролит — $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Возможно, что в составе цементного камня присутствуют и другие цеолитоподобные фазы. Исследователи отмечают низкую степень закристаллизованности цеолитов искусственного происхождения, образующихся при температуре до 300 °С, особенно в системах при высоком содержании CaO, поэтому их идентификация с

помощью РФА затруднена. Также отмечены линии оксидов магния и алюминия. Оксид алюминия относится к высокоплавким, термостойким компонентам. Огнестойкость оксида магния 1050 °С, до этой температуры он не претерпевает никаких модификаций.

В начальный период нагревания гелей, продолжительность которого различна в разных случаях, рентгенофазовый анализ не обнаруживает кристаллов цеолитов в гелях. Предполагается, что это свидетельствует о существовании индукционного периода, времени в течение которого зародыши кристаллов вырастают до критических размеров. Продолжительность индукционного периода значительно сокращается с ростом температуры при одновременном сокращении продолжительности всего процесса кристаллизации. Но необходимо отметить, что температура не является единственным фактором, определяющим продолжительность кристаллизации цеолитов одного и того же типа.

Если рассматривать низкотемпературную альфа-модификацию кварца, то структурно она не сильно отличается от бета-аналога. В процессе полиморфного преобразования высокотемпературной формы в низкотемпературную, кислородо-кремневые тетраэдры смещаются относительно центра, что приводит к уплотнению кристаллической решётки с нарушением её симметрии. Таким образом, из шестерных осей образуются тройные, но связи между группами тетраэдров остаются неизменными. Также отсутствуют изменения в плане спирального заворота. Тригональный бета-кварц устойчив к температурным режимам до 573°С, двуокись кремния в форме гексагонального альфа-кварца устойчив при температурах 573 – 870 °С.

Дериватограмма цементного камня естественного твердения приведена на рис. 5.

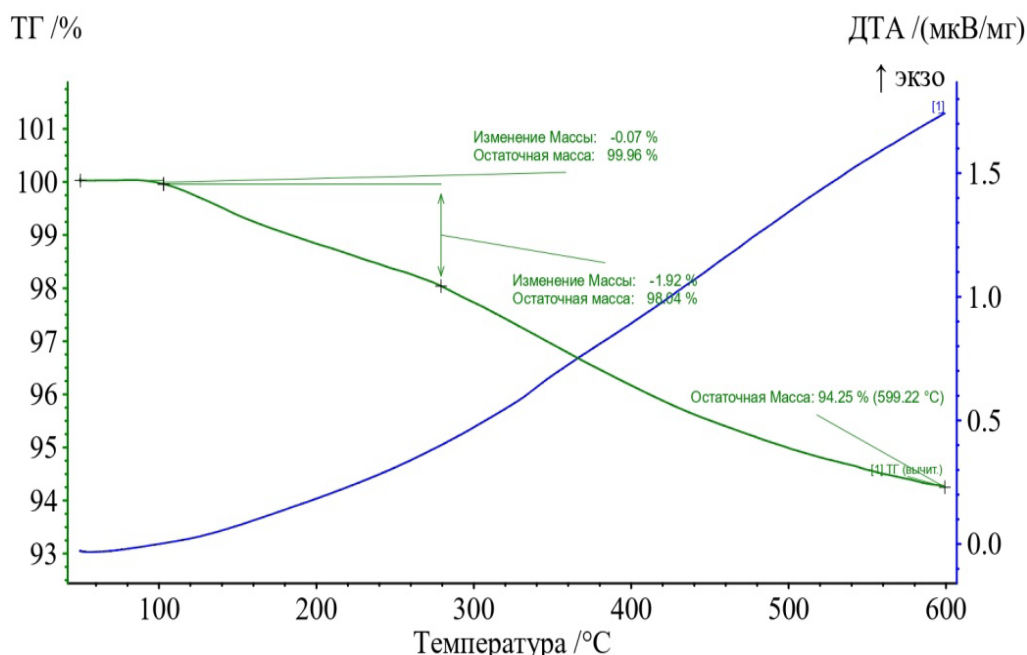


Рис. 5. Дериватограмма цементного камня естественного твердения

Результаты ДТА цементного камня показали небольшой эндотермический эффект при низких температурах, который связан с удалением слабосвязанной воды из цеолитов или низкоосновных гидросиликатов кальция. При этом, процесс этот носит постепенный характер. На кривой массопотери нет выраженных изменений угла наклона касательной.

Таким образом, в результате физико-химических исследований можно сделать вывод, что потери при прокаливании в интервале 100...550°C составили 8.01 %, что свидетельствует о значительной степени дегидратации составляющих цементного камня. Как отмечено выше для образовавшихся цеолитов это не приводит к существенным изменениям линейных размеров. Основная часть химически связанной воды удаляется при температуре 700–1000°C. В результате этого гидроалюмосиликатные цеолиты, предположительно натролит, а также оксиды алюминия и кварца в пределах эксплуатационных температур обладают повышенной термостойкостью [14-16].

5. Выводы

- Прочность жаростойкого газобетона при сжатии в суточном возрасте достигает 2,3 МПа при средней плотности 600 кг/м³.

- Самозатвердевание газобетона осуществляется в результате термической реакции в течение 10 минут.
- Термическая стойкость составляет 130 воздушных или 15 водных теплосмен. Повышенная термостойкость обусловлена использованием шлакощелочного вяжущего, а также введением в состав газобетона золошлаков Нч ГРЭС фракции 0 – 5 мм
- Температура применения газобетона 550 °С.

6. Заключение.

Технология шлакощелочного газобетона позволяет в условиях маломеханизированного участка производить термоизоляцию паропроводов сложной конфигурации и его эксплуатации при высокой влажности и частой смене режима работы паропроводов.

7. Патенты (Patents)

1. Патент № 2777325 С1 Российская Федерация, МПК С04В 28/26, С04В 38/02. Шлакощелочной ячеистый бетон : № 2021123607 : заявл. 05.08.2021 : опубл. 02.08.2022 / А. Г. Авакян, К. Д. Проценко ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Южно-Российский государственный политехнический университет. – EDN LSZNKE. (<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49309589>)

2. Патент № 2526931 С2 Российская Федерация, МПК В28С 5/16, В01F 7/18. Диспергидратор : № 2012135750/03 : заявл. 20.08.2012 : опубл. 27.08.2014 / А. Г. Авакян, П. С. Маслов, Р. В. Овчинников [и др.] ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт)". – EDN ZLUYPB. (<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37803659>)

8. Дополнительные материалы:

Следующие материалы доступны онлайн: <http://tekhnosfera.com/modifikatsiya-struktury-tsementnyh-betonov-napolnitelyami-iz-zoloshlakovyh-othodov-novoherkasskoy-gres#ixzz6o8mzjaG2>

Литература

1. Разработка и исследование жаростойкого шлакощелочного газобетона с добавками золуноса кислых углей / С. И. Евтушенко, Г. М. Скибин, А. Г. Авакян, К. Д. Проценко // Строительство и архитектура. – 2022. – Т. 10. – № 3. – С. 6-10. – DOI 10.29039/2308-0191-2022-10-3-6-10. – EDN VESOFW. (<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49463693>)
2. Emelianov, S. et al. (2023). Fast-Hardening Slag-Alkaline Heat-Resistant Aerated Concrete of Increased Heat Resistance with Additives of Fly Ash of Novoherkassk SDPP. In: Vatin, N., Pakhomova, E.G., Kukaras, D. (eds) Modern Problems in Construction. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 287. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-12703-8_16.
3. Hamad, A.J. Materials, Production, Properties and application of aerated lightweight concrete: Review. Int. J. Mater. Sc. Ert. 2014, 2, 152—157.

4. Fernandez-Jiménez A., Palomo A., Alonso M.M. (2005a) "Alkali Activation of fly ashes: Mechanisms of reaction", 2nd Inter. Symposium NON-TRADITIONAL CEMENT & CONCRETE, Brno, Czech Republic.
5. Duxon P., Fernandez-Jiménez A., Provis J.L., Lukey G.C, Palomo A., Van Deventer J.S.J, (2007a), " Geopolymer technology: the current state of the art", J. Mat. Sci. 42 (9) 2917- 2933.
6. Hajimohammadi, A; Provis, JL; van Deventer, JSJ, (2010) Effect of Alumina Release Rate on the Mechanism of Geopolymer Gel Formation, Chemistry Of Materials, 22, (18), 5199- 5208.
7. Criado, A. Palomo, A. Fernadez-Jiménez (2005) "Alkali activation of fly ashes. Part 1: Effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products", Fuel, 84, 2048-2054.
8. Таблицы математической статистики. Большев Л.Н.,Смирнов Н.В.-М: Наука. Главная редакция физико-математической литературы,1983.-410 с.
9. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий- М.:Наука, 1976, 278 с.
10. Вознесенский В. А., Ковальчук А. Ф. Принятие решений по статистическим моделям. — М.: Статистика, 1978. 192 с.
11. Патент № 2777325 С1 Российская Федерация, МПК С04В 28/26, С04В 38/02. Шлакощелочной ячеистый бетон : № 2021123607 : заявл. 05.08.2021 : опубл. 02.08.2022 / А. Г. Авакян, К. Д. Проценко ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Южно-Российский государственный политехнический университет. — EDN LSZNKE. (<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49309589>).
12. Prasittisopin, L.; Trejo, D. Effects of mixing variables on hardened characteristics of Portland cement mortars. ACI Mater. J. 2014, 111, 1—6.
13. Патент № 2526931 С2 Российская Федерация, МПК В28С 5/16, В01F 7/18. Диспергидратор : № 2012135750/03 : заявл. 20.08.2012 : опубл. 27.08.2014 / А. Г. Авакян, П. С. Маслов, Р. В. Овчинников [и др.] ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт)". — EDN ZLUYPB. (<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37803659>).
14. Князев А.В., Сулейманов Е.В. " Основы рентгенофазового анализа". Учебно-методическое пособие. Н. Новгород. 2005. 23 с.
15. Азаров Л., Бургер М. Метод порошка в рентгенографии. М.: Изд. Иностранной литературы. 1961. 364 с.
16. Рентгенография. Спецпрактикум. / Под ред. А.А.Кацнельсона. М.: Изд. МГУ. 1986. 240 с.