

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ
(ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

Разработка и исследование жаростойкого шлакощелочного газобетона с добавками зол-уноса кислых углей

УДК 666.974

Евтушенко Сергей Иванович

Профессор, д.т.н., почетный работник высшего образования Российской Федерации, советник РААСН, член РОМГТиФ, 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 (РОМГТиФ), 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

Статья получена: 24.08.2022. Рассмотрена: 20.09.2022. Одобрена: 27.09.2022. Опубликовано онлайн: 27.09.2022. © РИОР

1. Актуальность работы

Широкие возможности шлакощелочного цемента открыли перспективу получения высокопрочных

жароупорных шлакощелочных бетонов на заполнителях обычного и пониженного качества. Впервые высокопрочные шлакощелочные бетоны на мелком заполнителе были получены В. Д. Глуховским. Экс-

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF HEAT-RESISTANT SLAG-ALKALINE AERATED CONCRETE WITH ADDITIVES OF ASH-ENTRAINMENT OF ACIDIC COALS

Evtushenko Sergej 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), Novochechassk, 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), Novochechassk, 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), Novochechassk, Russia;

e-mail: kirill.procenko98@gmail.com

Abstract: The paper presents the results of the development of a fast-hardening slag-alkaline heat-resistant aerated concrete with an application temperature of up to 550°C for emergency, repair, restoration work and surface insulation in monolithic and prefabricated versions with additives of fly ash from Novochechassky SDES.

Keywords: blast furnace granular slag, fly ash, technical perhydrol, sodium hydroxide, heat-resistant cellular concrete

периментальные основы технологии таких бетонов заложены в работе [1].

Шлакощелочные вяжущие – это гидравлические вяжущие вещества, получаемые измельчением гранулированных шлаков совместно со щелочными компонентами или затворением молотых шлаков растворами соединений щелочных металлов (натрия и калия), дающих щелочную реакцию. Для получения шлакощелочных вяжущих применяют гранулированные доменные шлаки, электротермофосфорные, цветной металлургии [2-8].

Наименьшим снижением прочности при нагревании до 800 С обладают бетоны на основе жидкого стекла и шамотного заполнителя. Кроме того, анализ результатов проведенных исследований подтвердил, что снижение в цементном камне количества гидросиликатов кальция, претерпевающих при регидратации значительные объемные изменения, увеличивает жаростойкость материала. Это достигается введением магнийсодержащей добавки, эффективность которой состоит еще и в том, что она снижает общее содержание гидратной фазы вследствие низкой гидратационной способности магния. Наибольшим содержанием оксида магния (до 11 %) обладает Череповецкий доменный шлак.

В связи с тяжелыми условиями эксплуатации на Новочеркасской ГРЭС (частые перепады температур, повышенная влажность и т.д.) в качестве изоляции были выбраны не волокнистые материалы, а шлакощелочные бетоны с высокими запасом прочности, температурой применения и долговечности. Выбранная технология газобетона позволяет производить на участке малой механизации скорлупы и монолитную тепловую изоляцию при минимальных затратах на производственное оборудование и приспособления, а также ремонтные работы собственными силами.

2. Цель работы

Целью работы является разработка технологии быстротвердеющего жаростойкого газобетона для организации участка малой механизации на территории станции по тепловой изоляции паропроводов высокого давления Новочеркасской ГРЭС, средней плотностью 600 кг/м³ и температурой применения до 550 С повышенной термостойкости.

3. Материалы и методы

Быстротвердеющий жаростойкий газобетон состоит из щелочного вяжущего, наполнителей и газообразователя.

Щелочной компонент:

- натриевое жидкое стекло силикатный модуль $M_c=3$, плотность 1420 кг/м³ ГОСТ 13078-81;
- гидроксид натрия технический, плотность 1340 кг/м³ ГОСТ Р 55064-2012. Применяется для снижения силикатного модуля жидкого стекла.

Наполнители:

- Доменный гранулированный шлак (Череповецк) фракции 3000 см²/г. Череповецкие шлаки отличаются от других шлаков значительным содержанием оксида магния (до 11 %). Эффективность магнийсодержащей добавки состоит в том, что она снижает общее содержание гидратной фазы вследствие низкой гидратационной способности магния, увеличивает термостойкость.
- Зола-уноса Нч ГРЭС фракции 2500см²/г - мельчайшие частицы размером от нескольких микрон до 0,14 мм. Большинство зерен ошлакована и имеет округлую форму. Часть зерен ошлакована лишь снаружи — под стекловидной оболочкой находятся минералы, которые в момент сгорания пылевидного угля в топке не успели расплавиться. Строение самого зерна обусловлено весьма кратковременным пребыванием его в зоне высоких температур. В результате быстрого повышения температуры выгорание органических веществ, содержащихся в угле, и спекание минеральной части происходит почти одновременно. Выделяющийся при этом газ вспучивает расплав. Резкое охлаждение зерен стабилизирует стекловидную фазу. В результате частицы пылевидной золы представляют собой оплавленные зерна, многие из которых имеют мельчайшие, преимущественно замкнутые поры.
- Золошлаковые отходы Нч ГРЭС фракции 0 – 5 мм- стекловидные зерна неправильной формы с острыми гранями размером 0 до 5 мм. Значительная часть зерен имеет поры различных размеров, образовавшиеся в результате резкого испарения при попадании огненно-жидкого шлака в воду. В составе шлака содержится до 80 % частиц размером менее 0,14 мм.

Химический состав наполнителей жаростойкого газобетона

Компоненты	Химический состав, % по массе								
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	MnO	SO_3	<i>n.n.n</i>
Доменный гранулированный шлак (Череповец) фракции 3000 см ² /г	37,52	9,5	2,2		34,9	11,25	0,36	0,66	2,51
Зола-уноса Нч ГРЭС фракции 2500 см ² /г	41 53	15-22	5 - 9	0, 5	3-4	1-1,46	-	0,4- 0,8	10-14
Золошлаковые отходы Нч ГРЭС фракции 0 – 5 мм	48 – 56	20- 28	9 -13	0,5	4,5-5,0	1-1,46	-	0,5- 0,6	0-1

- Технический углерод, фр. 0-5 мм. - высокодисперсный продукт термического или термоокислительного разложения углеводородов, содержащихся в природных газах, нефтяных и каменноугольных маслах. Размер частиц (13—120 нм) или удельная поверхность 14–18 м²/г определяет «дисперсность» технического углерода. Основными физико-химическими показателями, характеризующими дисперсность, является удельная поверхность, которая составляет 14 – 18 м²/г и содержание углерода до 99 %.

Газообразователь:

- Техническая перекись водорода плотностью 1100 кг/м³, ГОСТ 10929-76.
- Химический состав наполнителей приведен в таблице 1.

4. Подбор составов шлакощелочных вяжущих

Формирование структуры строительных материалов на основе водных растворов силикатов натрия (жидкое стекло) [9, 10] - сложный физико-химический процесс, определяемый в основном физическим взаимодействием и химическими реакциями между силикатом натрия и минералами наполнителя, используемыми для получения вяжущих.

Согласно общим принципам структурообразования полиструктурной теории и теории конденсации диспергирования веществ [11], на формирование структуры шлакощелочных композиций значительное влияние оказывают структурообразующие фак-

торы: степень наполнения (жидко-твердое отношение), дисперсность, активность наполнителя, свойства водного раствора силиката натрия (силикатный модуль, модуль активности, плотность). Это определило порядок выполнения работы.

Применяемые в работе наполнители доменный гранулированный шлак и зола-уноса обладают различными свойствами, различной активностью, поэтому первостепенной задачей явилось определение оптимального соотношения между применяемыми наполнителями (С). Применение молотого гранулированного шлака объясняется его химической активностью, а золы-уноса экономической целесообразностью, т.к. она является отходом Новочеркасской ГРЭС. Кроме того, зола - унос имеет низкую плотность, что дает возможность получить газобетон с пониженной плотностью и улучшенными теплотехническими характеристиками, а также повысить жаростойкие свойства бетона.

5.1. Определение оптимальной плотности жидкого стекла и соотношения молотого гранулированного шлака и золы-уноса

Изучение влияния соотношения между молотым гранулированным шлаком с золой уноса осуществлялось по определению сроков схватывания шлакощелочного теста, а также по прочности при изгибе и сжатии в возрасте 1 сут. и 28 сут. нормального твердения.

Были исследованы шлакощелочные смеси при соотношении шлак-зола (Ш/З) С = 0,66; 1,0; 1,5; 2,0. При этом, применяли жидкое стекло с силикатным модулем $M_c=3$, но с различной плотностью, а именно: =1100 кг/м³; 1200 кг/м³; 1250 кг/м³; 1280 кг/м³.

Таблица 2.

Составы шлакощелочных композиций

Составляющие	Содержание составляющих в массовых частях при соотношении С (Ш/З)			
	0,66	1,0	1,5	2,0
Молотый гранулированный шлак	1,0	1,0	1,5	2,0
Зола-унос Новочеркасской ГРЭС	1,5	1,0	1,0	1,0
Водный раствор силиката натрия жидкое стекло плотностью, кг/м ³ :				
1100	0,86	0,78	0,75	0,65
1200	0,82	0,73	0,64	0,59
1250	0,85	0,79	0,66	0,49
1280	0,90	0,84	0,75	0,62
от суммы сухих компонентов				

Таблица 3.

Сроки схватывания шлакощелочных композиций при различных соотношениях шлак-зола

Плотность жидкого стекла, кг/м ³	Сроки схватывания шлакощелочных композиций при соотношении шлак-зола, мин.							
	Начало				Конец			
	0,66	1,0	1,5	2,0	0,66	1,0	1,5	2,0
1100	80	70	65	55	140	130	115	-
1200	65	40	35	30	90	70	60	-
1250	140	130	115	105	-	-	-	-
1280	95	70	60	50	-	-	-	-

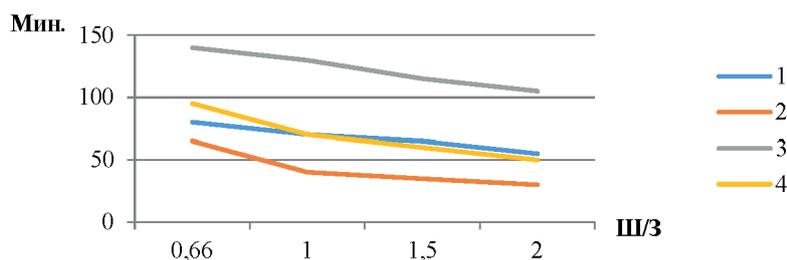


Рис. 1. Зависимость сроков схватывания шлакощелочных композиций от соотношения шлак-зола и плотности вводимого жидкого стекла:
1 - 1100 кг/м³; 2 - 1200 кг/м³; 3 - 1250 кг/м³; 4 - 1280 кг/м³

Расход водного раствора силиката натрия подбирался для получения подвижной шлакощелочной смеси равной 27 28 см по расплыву на приборе Суттарда.

Составы шлакощелочных композиций приведены в таблице 2. Результаты испытаний приведены в табл. 3 5 и на рис. 1 3.

Повышенное содержание золы-уноса в данном случае 0,66 (табл. 3, рис. 1) вызывает замедление

сроков схватывания, но с увеличением массовой части молотого гранулированного шлака активность композиции повышается, что подтверждается сокращением сроков схватывания как для композиций с жидким стеклом плотностью 1100 кг/м³, так и шлакощелочных композиций с плотностью жидкого стекла = 1200 кг/м³; 1250 кг/м³; 1280 кг/м³.

Таблица 4.

Прочность шлакощелочных композиций в возрасте 1 суток нормального твердения*

Плотность жидкого стекла, кг/м ³	Прочность, МПа при соотношении Ш/З			
	0,66	1,0	1,5	2,0
1100	0/0,22	0/0,58	0/0,62	0/0,72
1200	-/0,56	-/1,60	0/2,40	0/2,80
1250	0,40/1,05	0,62/1,30	0,75/1,64	0,88/1,82
1280	0,18/0,74	0,20/0,84	0,35/0,98	0,45/1,20

* - В числителе - прочность при изгибе; в знаменателе при сжатии

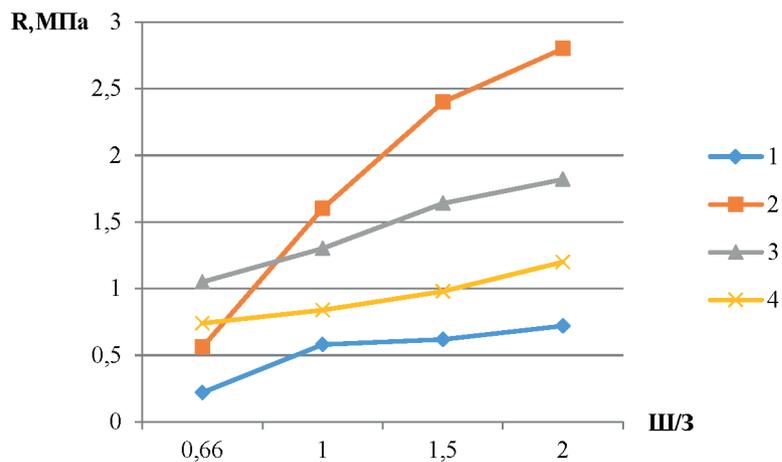


Рис. 2. Зависимость прочности при сжатии шлакощелочных композиций от соотношения Ш/З в возрасте 1 суток нормального твердения при плотности жидкого стекла:
1 - 1100 кг/м³; 2 - 1200 кг/м³; 3 - 1250 кг/м³; 4 - 1280 кг/м³

Таблица 5.

Прочность шлакощелочных композиций в возрасте 28 суток нормального твердения*

Плотность жидкого стекла, кг/м ³	Прочность, МПа при соотношении Ш/З			
	0,66	1,0	1,5	2,0
1100	0,21/0,38	0,68/0,74	0,72/0,92	0,83/1,57
1200	1,41/3,63	1,69/9,85	3,21/9,92	3,84/10,25
1250	1,84/8,56	2,44/10,47	3,84/11,84	4,33/12,32
1280	1,25/3,03	1,45/3,42	2,24/7,67	3,03/8,85

* - В числителе - прочность при изгибе; в знаменателе при сжатии

Анализ проведенных исследований показал, что наиболее оптимальным соотношением шлакозола является С= 2:1, так как уменьшение доли шлака и увеличение золы-уноса приводит к значительному снижению прочности как в возрасте 1

суток так и в возрасте 28 суток нормального твердения. Плотность затвердевших силикатных композиций уменьшается с увеличением содержания золы - уноса, что объясняется ее пониженной насыпной плотностью.

Таблица 6.

Плотность шлакощелочных композиций

Плотность жидкого стекла, кг/м ³	Плотность, кг/м ³ при соотношении Ш/З			
	0,66	1,0	1,5	2,0
1100	680	762	840	920
1200	1052	1170	1250	1270
1250	1090	1190	1200	1230
1280	900	937	980	1100

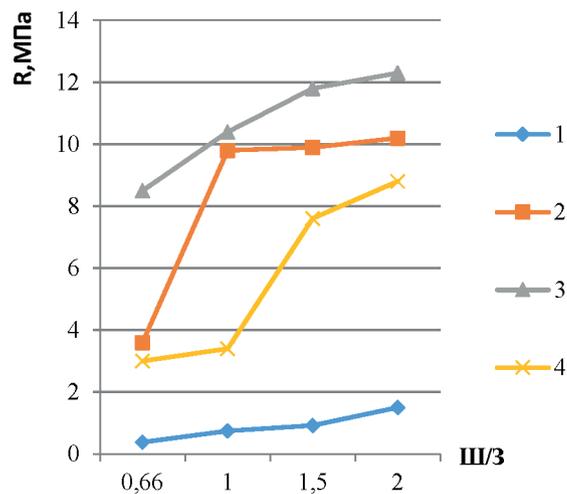


Рис. 3. Зависимость прочности при сжатии шлакощелочных композиций от соотношения Ш/З в возрасте 28 суток нормального твердения при плотности жидкого стекла: 1 - 1100 кг/м³; 2 - 1200 кг/м³; 3 - 1250 кг/м³; 4 - 1280 кг/м³

Изменение плотности жидкого стекла оказывает существенное влияние на прочностные характеристики композиций [12]. Так, по результатам исследований установлено резкое снижение прочности при изгибе и сжатии с уменьшением плотности жидкого стекла с 1280 до 1100 кг/м³. Учитывая высокую вязкость шлакожидкостекольных композиций, оказывающих отрицательное влияние на процессы вспучивания при производстве газобетона, целесообразно использовать жидкое стекло с плотностью 1250 кг/м³.

5.2 . Определение расхода жидкого стекла для шлакощелочных композиций различной подвижности

Подбор оптимального жидко-твердого отношения производили для смесей подвижностью 16 см,

21 см, 27см по прибору Суттарда, для жидкого стекла плотностью 1100; 1200; 1250; 1280 кг/м³ и силикатным модулем 3,0, по показателям прочности при сжатии и изгибе в возрасте 1 суток и 28 суток нормального твердения, по плотности в сухом состоянии. В качестве твердых компонентов использовали молотый гранулированный доменный шлак и золу уноса в соотношении (Ш/З) 1:1; 1:1,5; 2:1. Составы шлакощелочных композиций и результаты исследований приведены в таблице 7 и на рис. 4, 5, 6.

Анализируя полученные данные, установлено, что с увеличением жидкотвердого отношения увеличивается подвижность шлакощелочной смеси, а, следовательно, и расход жидкого стекла на 1м³ композиции. Причем, с увеличением плотности жидкого стекла увеличивается его расход для смесей с одинаковой подвижностью и равным шлакозольным отношением, что объясняется повышением вязкости

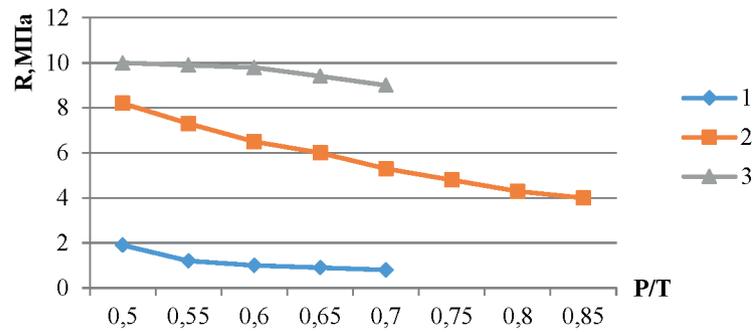


Рис. 5. График зависимости прочности при сжатии шлакощелочных композиций от жидко-твердого отношения в возрасте 28 суток при плотности жидкого стекла:
1 - 1100 кг/м³; 2 - 1200 кг/м³; 3 - 1280 кг/м³; при соотношении Ш:З=2:1

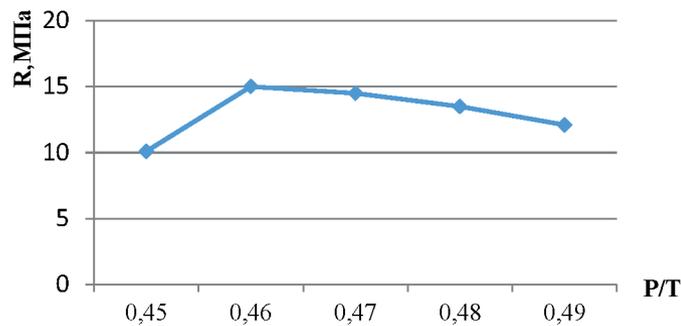


Рис. 6. График зависимости прочности при сжатии шлакощелочных композиций от жидко-твердого отношения в возрасте 28 суток при плотности жидкого стекла 1250 кг/м³; при соотношении Ш:З=2:1

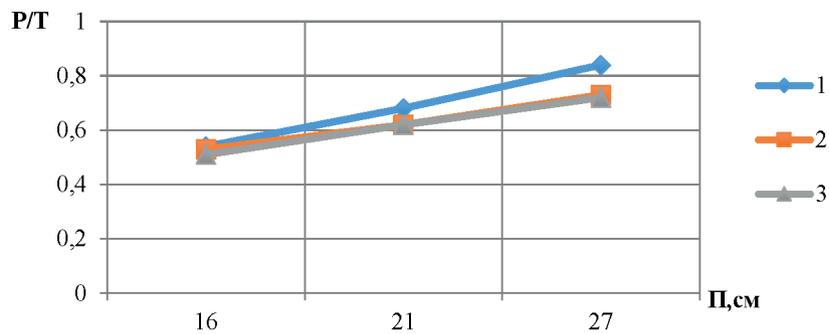


Рис. 4. График зависимости P/T отношения от подвижности и плотности жидкого стекла (при соотношении Ш:З = 1:1) при плотности жидкого стекла:
1 1100 кг/м³; 2 - 1200 кг/м³; 3 1280 кг/м³

жидкого стекла, следовательно, и расходом жидкого стекла на 1м³ композиции.

Повышение содержания золы в смеси твердых компонентов (соотношение Ш:З равное 1:1,5) вы-

зывает значительное увеличение жидко-твердого отношения. Это снижает прочность при изгибе и сжатии затвердевших композиций, хотя, при этом, несколько снижается их плотность.

Таблица 7.

Составы шлакощелочных композиций и их свойства

Соотношение Ш/З	Подвижность, см	Ж/Т	Предел прочности при изгибе, МПа		Предел прочности при сжатии, МПа		Средняя плотность в сухом состоянии, кг/м ³
			1 сут.	28сут.	1 сут.	28 сут.	
<i>Жидкое стекло плотностью = 1100 кг/м³</i>							
1:1	16	0,51	0,4	0,9	0,58	1,60	762
	21	0,60	0,5	0,65	0,6	1,25	820
	27	0,71	-	0,58	0,68	0,74	762
<i>Жидкое стекло плотностью = 1200 кг/м³</i>							
1:1	16	0,528	1,58	1,91	4,15	10,53	1250
	21	0,61	0,60	2,66	1,91	10,04	1200
	27	0,73	-	1,93	1,64	9,82	1170
1,0:1,5	16	0,64	-	1,88	0,39	6,54	1090
	21	0,71	-	1,75	0,82	5,07	1090
	27	0,92	-	1,36	0,56	3,63	1052
<i>Жидкое стекло плотностью = 1250 кг/м³</i>							
2:1	16	0,45	0,75	3,9	1,82	10,52	1150
	21	0,46	1,78	4,9	3,77	15,24	1190
	27	0,49	0,88	1,82	4,33	12,367	1230
<i>Жидкое стекло плотностью = 1280 кг/м³</i>							
1:1	16	0,55	-	2,85	1,74	8,92	1230
	21	0,69	0,18	1,59	1,33	4,68	976
	27	0,84	0,2	0,84	1,46	3,44	937

Применение жидкого стекла с плотностью 1100 кг/м³ способствует снижению жидкотвердого отношения для всех подвижностей смеси [9, 11], при этом наблюдается и снижение плотности затвердевших вяжущих. Кроме того, они обладают пониженной прочностью как при изгибе, так и при сжатии. Плотность раствора жидкого стекла является важнейшим физическим свойством, находящимся в зависимости от его химического состава и от общего содержания растворенных в нем твердых веществ – щелочных силикатов.

Плотность жидкого стекла закономерно возрастает с повышением его концентрации, главным образом, от количества растворенных в нем силикатных образований. Взаимодействие же жидкого стекла с основными доменными шлаками обуславливается реакциями между щелочными силикатами [12-18] и основными оксидами, входящими в состав шлаков и, в частности, СаО.

Пониженная прочность шлакощелочных композиций объясняется недостаточным количеством ще-

лочных силикатов в жидком стекле плотностью 1100 кг/м³.

По данным таблицы 7 видно, что наименьшее жидко-твердое отношение имеют составы с жидким стеклом плотностью 1250 кг/м³ при соотношении твердых компонентов Ш:З равное 2:1. Кроме того, эти же составы имеют и более высокую прочность.

5.3 Выбор газообразователя и модуля жидкого стекла для самозатвердевающего газобетона

Формирование капиллярно-пористой структуры ячеистого бетона происходит в результате действия технологических факторов в процессе приготовления смесей, образующих коагуляционно-кристаллизационные структуры при схватывании и твердении.

Процессы микро- и макроструктуры образования ячеистого бетона зависят от вида, свойств и количества сырьевых компонентов, от применяемого газо-

Влияние количества и вида газообразователя на прочностные свойства бетона

<i>Вид и количество газообразователя, % от суммы сухих компонентов</i>	<i>Плотность в сухом состоянии, кг/м³</i>	<i>Прочность при сжатии в сухом состоянии в возрасте 28 сут., МПа</i>
Алюминиевая пудра, % 0,04	610	7,95
0,07	1150	13,56
Пергидроль, % 1,0	1210	15,74
2,0	900	10,36
3,0	620	8,25

образователя, коэффициента его использования, от температуры смеси и величины водотвердого отношения [19].

Процесс образования пор в газобетоне зависит не только от свойств газообразователя, его количества и температурных условий, но и от свойств и соотношения растворной смеси: ее способности вспучиваться под действием выделяющегося газа и удерживать его. Чтобы полнее использовать газообразующую способность компонентов и получить соответствующую степень пористости бетона, растворная смесь должна легко вспучиваться и не препятствовать выделению газа в смеси и в то же время обладать необходимой газодерживающей способностью. Смесь должна иметь достаточную подвижность в период газообразования и в то же время обладать необходимой пластической вязкостью, чтобы препятствовать стремлению образующихся пузырьков газа к прорыву отдельных воздушных ячеек и к образованию сквозных путей для выхода газа наружу.

Необходимо регулировать сроки схватывания вяжущего путем выбора его активности, тонкости помола, температуры смеси и окружающей среды, технологии перемешивания газобетона, а также применение (в необходимых случаях) добавок, замедляющих или ускоряющих сроки схватывания, чтобы к моменту окончания выделения газа смесь загустевала и приобретала бы необходимую прочность, благодаря которой фиксируется ячеистая структура бетона. Слишком быстрое выделение газа в смеси, не сопровождающееся постепенным ее загустеванием, может привести к оседанию еще не схватившейся массы под действием собственной массы. Важно также, чтобы процесс газовыделения закончился раньше, чем система потеряет надлежащую подвижность, т.е. до схватывания смеси [20, 21].

Сравнение показателей ячеистого бетона, изготовленного на различных видах газообразователей, позволяет сделать вывод, что предпочтение нужно отдавать пергидролю. Применение пергидроля, существенно, также упрощает технологию приготовления технологической смеси, т.к. он равномерно распределяется по всему объему смеси. Применение алюминиевой пудры требует дополнительных операций: обезжиривания или ее прокаливания, приготовление высокооднородной водно-алюминиевой суспензии, что требует установки дополнительного оборудования.

На первом этапе, критерием оценки качества газобетона являлись прочностные характеристики для заданной плотности газобетона 600 кг/м^3 , так как от прочности косвенно зависит термостойкость. В опытах применяли составы вяжущих с соотношением твердых компонентов: молотый гранулированный шлак и зола-уноса Новочеркасской ГРЭС: 2:1, водный раствор силиката натрия плотностью 1250 кг/м^3 с силикатным модулем от 1,45 до 3,00.

Выбор пергидроля объясняется результатами исследований и данными, представленными в таблице 8.

При прибавлении к жидкому стеклу перекиси водорода (пергидроля) происходит выделение газообразного кислорода и выпадение стекловидного геля SiO_2 , который постепенно, примерно в течение двух часов, переходит в студнеобразное состояние. Эту реакцию следует рассматривать как взаимодействие гидrolитически образующейся едкой щелочи и очень слабой кислоты - перекиси водорода. При этом происходит нейтрализация кислоты основанием и коагулирование кремнезема, образующего коллоидный осадок. Чем щелочнее раствор жидкого стекла, тем энергичнее должна протекать эта реакция нейтрализации.

Концентрированная перекись водорода вызывает нежелательное ускорение реакции со щелочным компонентом бетонной смеси, поэтому выбран раствор перекиси водорода с водой в соотношении 1:1.

Учитывая вышесказанное, для определения оптимального содержания щелочного компонента в вяжущем (в пересчете на Na_2O) и силикатного модуля жидкого стекла была проделана серия предварительных экспериментов для газобетона различной плотности. В ходе исследований варьировали силикатный модуль жидкого стекла (M_c) в пределах от 1,6 до 3, для чего вводили водный раствор NaOH плотностью $=1340 \text{ кг/м}^3$. Причем содержание Na_2O изменяли как за счет расхода жидкого стекла, так и за счет расхода раствора гидроксида натрия. Жидко-твердое отношение подбирали таким образом, чтобы получить расплыв газобетонной смеси равный 27 см на приборе Сутгарда. Прочность при сжатии определяли в возрасте одних и 28 суток нормального твердения на образцах-кубах размером $7,07 \times 7,07 \times 7,07 \text{ см}$. Перед испытанием образцы высушивали при температуре $100\text{-}105 \text{ }^\circ\text{C}$.

Снижение силикатного модуля осуществляли введением водного раствора NaOH с изменением содержания его в перерасчете на Na_2O от 10,3% до 7,5% для составов 1-5 и от 3% до 6% для составов 6-8. И в первом

и во втором случаях наблюдается тенденция увеличения прочностных показателей с увеличением содержания Na_2O . Это объясняется, по-видимому, тем, что чем щелочнее раствор жидкого стекла, тем энергичнее протекает реакция взаимодействия перекиси водорода с едкой щелочью. Кроме того, прибавление к жидкому стеклу щелочного оксида Na_2O приводит к обогащению растворов щелочью и к переходу высокомолекулярных силикатов в силикаты с относительно меньшим содержанием в них кремнезёма. Повышение щелочности среды способствует большей растворимости основных оксидов шлака и, в частности, CaO . Растворившиеся оксиды шлаков подвергаются в растворе жидкого стекла гидратации, а образовавшиеся гидроокиси реагируют со щелочными силикатами. При этом образуются силикаты соответствующих оксидов, обладающих меньшей растворимостью, чем растворившиеся гидроокисиды. Введение Na_2O в виде раствора целесообразнее так как, кроме снижения силикатного модуля, наблюдается еще эффект пластификации шлакощелочной смеси. Увеличение Na_2O в смеси за счет увеличения расхода жидкого стекла не снижает силикатного модуля без дополнительного введения водного раствора едкого натрия [22].

Результаты исследования представлены на рисунках 7-9 и в таблице 9

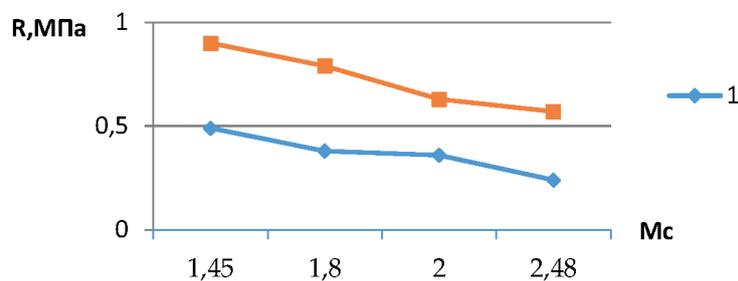


Рис. 7. Зависимость прочности газобетона от силикатного модуля жидкого стекла: 1 - в возрасте 1 суток; 2 - в возрасте 28 суток для пенобетона плотностью 540 кг/м^3

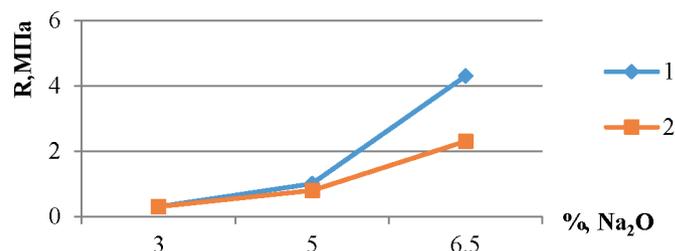


Рис. 8. Зависимость прочности газобетона от содержания Na_2O (для соотношения Ш:3=1:1): 1 - в возрасте 1 суток; 2 - в возрасте 28 суток

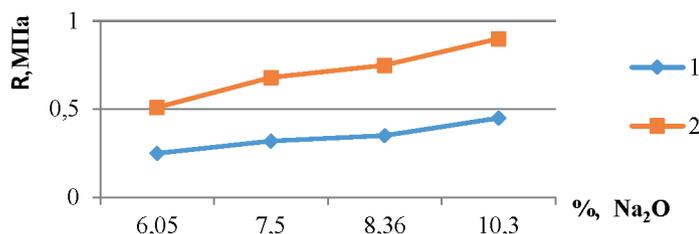


Рис. 9. Зависимость прочности газобетона от содержания Na₂O (для соотношения Ш:З=2,5:1):
1 - в возрасте 1 суток; 2 - в возрасте 28-суток

Таблица 9.

Составы и прочность шлакощелочного конструкционно-жаростойкого газобетона

Наименование	Составы							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Плотность, кг/м ³	540	540	540	540	420	690	580	845
Шлак, массовая часть	2	2	2	2	2	2,5	2,5	2,5
Зола-унос, массовая часть	1	1	1	1	1	1	1	1
Жидкое стекло, от суммы сухих компонентов, масс. ч.	0,5	0,5	0,5	0,5	0,57	0,322	0,536	0,323
Силикатный модуль жидкого стекла	1,45	2,0	1,8	2,48	2,5	3,0	3,0	1,8
Пергидроль от массы сухих компонентов, масс. ч.	0,048	0,048	0,048	0,048	0,061	0,042	0,042	0,042
Жидко-твердое отношение	0,528	0,535	0,535	0,528	0,552	0,461	0,505	0,472
Едкий натрий от массы шлака (в перерасчете на Na ₂ O) всего, в %: - в т.ч. в жидком стекле	10,31	7,53	8,36	6,05	7,58	3,03	5,02	6,52
- в растворе NaOH	5,32	2,54	3,36	1,05	1,56	-	-	1,54
Свойства: прочность при сжатии, МПа: - в возрасте 1 суток	4,65	3,37	3,68	2,69	2,96	1,94	3,78	4,25
- в возрасте 28 суток	9,15	6,64	7,55	5,33	4,93	4,85	4,93	9,57
Температура применения	550	550	550	550	550	550	550	550
Температурная усадка	1,48	1,48	1,44	1,43	1,45	1,45	1,43	1,37

Из данных таблицы 9 и графиков 7-9 видно, что уменьшение силикатного модуля для составов 1-5 от 2,50 до 1,45 способствует повышению прочностных показателей газобетона как в возрасте 1 суток, так и в возрасте 28 суток нормального твердения.

Резкого изменения плотности высушенных образцов при этом не наблюдается.

6. Выводы

Установлено рациональное соотношение между расходом шлака и золой - унос 2:1.

Зафиксированы максимальные прочностные характеристики при жидко-твердом отношении, рав-

ном 0,45-0,49. При этих же условиях получена и максимальная прочность при сжатии и суточном возрасте - 1,8-4,3 МПа без тепловой обработки.

3. Установлена целесообразность использования в качестве газообразователя перекиси водорода, а именно, пергидроля технического.

4. Определено влияние силикатного модуля жидкого стекла на физикомеханические свойства газобетона. Получена зависимость прочности газобетона от изменения модуля жидкого стекла с 2,48 до 1,25; с уменьшением силикатного модуля прочность возрастает.

5. Исследовано влияние содержания едкого натрия (в перерасчете на Na₂O) в газобетонной смеси

на свойства газобетона. Установлено, что повышение Na_2O с 6 до 10% повышает прочностные показатели вдвое.

6. Установлено, что нагрев разработанных составов газобетона до $t=550^\circ\text{C}$ не снижает прочности газобетона.

7. Патенты

Шлакощелочной ячеистый бетон: пат. 2 777 325 Рос. Федерация: МПК С04В 28/26, С04В 38/02 Авакян А. Г., Проценко К. Д. - №2021123607; за-явл. 05.08.2021; опубл. 02.08.2022 Бюл. № 22

Литература

1. Глуховский В.Д. Грунтосиликаты, их свойства, технология изготовления и область применения. Автореф. дис... д-ра тех. наук. Киев, 1965
2. Fernandez-Jimenez, A; Palomo, A; Pastor, JY, A. Martin (2008), "New Cementitious Materials Based on Alkali-Activated Fly Ash: Performance at High Temperatures", *Journal Of The American Ceramic Society*, 91, (10), 3308-3314.
3. Рахимова Н.Р. Газобетоны на основе композиционных шлакощелочных вяжущих / Н.Р. Рахимова, Р.З. Рахимов, Г.А. Фатыхов, Д.П. Кузнецов // *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. Технологии бетонов. 2009. - №7-8 (36-37). - С.34-35*
4. Ракша В.А. Исследование влияния химического состава шлаков на свойства шлакощелочных вяжущих бетонов. Автореф. дис. ... канд. тех. наук. Киев, 1975
5. Fernandez-Jimenez A., Garcia-Lodeiro I., and Palomo A., (2007), "Durability of alkali-activated fly ash cementitious materials", *J. Materials Science*, 42, 3055-3065.
6. Рахимов, Р.З. Бетоны на основе композиционных шлакощелочных вяжущих / Н.Р. Хабибуллина, Р.З. Рахимов, М.М. Рахимов, А.А. Соколов, Р.Ф. Гатауллин // *Строительные материалы. 2005. - №8. - С. 16-17.*
7. Rakhimova, N.R. Compositional slag-alkaline bindings / N.R. Rakhimova, R.Z. Rakhimov // 16. *Internationale Baustofftagung, Tagungsbericht, Band 1, Weimar. 2006. - P. 1171-1176.*
8. Хабибуллина, Н.Р. Повышение эффективности шлакощелочных вяжущих и бетонов / Н.Р. Хабибуллина, Р.З. Рахимов // *Бетон и железобетон. -2006. -№5. -С. 15-17.*
9. Тотурбиев Б.Д. *Строительные материалы на основе силикатнатриевых композиций. - Стройиздат. 1988. - 208.*
10. Иващенко, Ю.Г. Повышение водостойкости теплоизоляционных материалов на основе жидкого стекла / Ю.Г. Иващенко, И.Б. Древяко // *Современные проблемы строительного материаловедения. Седьмые академические чтения РААСН (Белгород) 2001. - С. 150-152.*
11. Соломатов, В.И. Развитие полиструктурной теории композиционных строительных материалов. / Соломатов, В.И. // ИВУЗ: Строительство. - Новосибирск, 1985. - №8. - С 58-64.
12. Puertas, F. Pore solution in alkali-activated slag cement pastes. Relation to the composition and structure of calcium silicate hydrate / F.Puertas, A.Fernandez-Jimenez, M.T. Blanco-Varela // *Cement and Concrete Research* 34. -2004. -P.139-148.
13. Criado, A. Palomo, A. Fernandez-Jimenez (2005) "Alkali activation of fly ashes. Part 1: Effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products", *Fuel*, 84, 2048-2054.
14. Palomo A., Fernandez-Jimenez A., Kovalchuk G. (2005b), "Some key factors affecting the alkali activation of fly ash", 2nd Inter. Symposium NON-TRADITIONAL CEMENT & CONCRETE, Brno, Czech Republic.
15. Criado M., Fernandez-Jimenez A., Palomo A., (2007a) "Alkali Activation of fly ash. Effect of the SiO₂/O ratio. Part I: FTIR study", *Microp. Mesop. Mat.*, 106, 180-191.
16. van Jaarsveld J.G.S. and van Deventer J.S.J. (1999), "Effect of the alkali metal activator on the properties of fly ash-based geopolymers" *Ind. Eng. Chem. Res.* 38, 3932-3941.
17. Fernandez-Jimenez A., Palomo A., Lfipez-Hombrados C., (2006c), "Some engineering properties of alkali activated fly ash concrete", *ACI Materials Journal* 103 (2), 106-112
18. Palomo A., Fernandez-Jimenez A., Lopez-Hombrados C., Lleyda I.L., (2004b) "Precast elements made of alkali-activated fly ash concrete", *International Conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete. Ed. V.M. Malhotra,*
19. Sofi M., van Deventer J.S.J., Mendis P.A., Lukey G.C. (2007) "Engineering properties of inorganic polymer concretes (IPCs)", *Cem. Concr. Res.* 37, 251-257
20. Dehwah, H.A.F. Mechanical properties of self-compacting concrete incorporating quarry dust powder, silica fume or fly ash. *Constr. Build. Mater.* 2012, 26, 547-551.
21. Katz, A.; Bauni, H. Effect of high levels of fines content on concrete properties. *ACI Mater.* 2006, ION, 474-482.
22. Шлакощелочной ячеистый бетон: пат. 2 777 325 Рос. Федерация: МПК С04В 28/26, С04В 38/02 Авакян А. Г., Проценко К. Д. - №2021123607; за-явл. 05.08.2021; опубл. 02.08.2022 Бюл. № 22