

Министерство науки и высшего образования РФ
Южно-Уральский государственный университет (НИУ)
Институт «Архитектурно-строительный»
Кафедра «Строительные материалы и изделия»

ВКР ПРОВЕРЕНА

Рецензент

/А.М. Белоусов/

« »

2021 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

/А.А. Орлов/

« »

2021 г.

Пояснительная записка к выпускной квалификационной работе

08.04.01.2020.029.00.00.ПЗ

Жаростойкий вермикулитобетон на глиноземистом цементе с добавками на основе эфиров карбоксилатов

Руководитель

/В.А. Абызов/

« »

2021 г.

Автор

Студент группы АСЗ-392

/С.А.Беляев/

« 25 »

01

2021 г.

Нормоконтролер

/Т.Н.Черных/

« »

2021 г.

Челябинск
2021 г

АННОТАЦИЯ

Беляев С.А. Жаростойкий вермикулитобетон на глиноземистом цементе с добавками на основе эфиров карбоксилатов – Челябинск: ЮУрГУ, СМиИ, 2021, 82 с., 19 ил., 13 табл.

Библиографический список – 37 наименований.

В выпускной квалификационной работе рассмотрены основные свойства жаростойких теплоизоляционных бетонов, основные виды заполнителей и вяжущих материалов, применяемых для их производства, изучены научные публикации по исследованию различных составов жаростойких вермикулитобетонов.

Разработан оптимальный состав жаростойкого теплоизоляционного вермикулитобетона на основе глиноземистого цемента с добавкой ферротитанового шлака, определены его эксплуатационные показатели и зависимость физико-механических свойств от цементвермикулитового и водовермикулитового отношения в составе смеси, изучено влияние добавки Melflux 1641F на водопотребление и физико-механические свойства бетона, проведен расчет экономической целесообразности применения полученного теплоизоляционного материала.

					08.04.01.2020.029.00.00.ПЗ			
Изм	Дата	№ докум.	Подпись	Дата	Жаростойкий вермикулитобетон на глиноземистом цементе с добавками эфиров карбоксилатов	Литера	Лист	Листов
Разраб.		Беляев С.А.				ВКР	2	82
Проверил		Абызов В.А.				ЮУрГУ (НИУ) Кафедра «Строительные материалы и изделия»		
Нормоконтр.		Черных Т.Н.						
Зав. каф.		Орлов А.А.						

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР	8
1.1 Состав жаростойких бетонов.....	8
1.2 Свойства жаростойких бетонов.....	11
1.3 Теплоизоляционные жаростойкие бетоны	13
1.4 Производство вспученного вермикулита.....	23
1.5 Теплоизоляционные жаростойкие бетоны на основе вермикулита ..	24
1.6 Жаростойкие теплоизоляционные ячеистые бетоны	36
1.7 Выводы по литературному обзору	38
1.8 Цели и задачи исследования	38
2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	40
2.1 Исходные материалы	40
2.2 Методы исследований	45
3 ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЧАСТЬ	49
3.1 Исследование вермикулитобетона на основе глиноземистого цемента с добавкой ферротитанового шлака	49
3.2 Выводы по исследовательской части.....	62
4 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ.....	65
5 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ.....	68
6 БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ.....	7-
6.1 Классификация опасных и вредных производственных факторов ...	70
6.2 Опасные и вредные производственные факторы, связанные с производством вермикулитобетона и изделий на его основе	72
7 ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ.....	76
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	77
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	78

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время, ввиду огромного количества промышленных предприятий и высоких темпов роста производства различных материалов, для получения которых требуется эксплуатация тепловых и нагревательных агрегатов, особо важным является исследование и получение новых экономически выгодных в применении теплоизоляционных бетонов. Применение такого рода материалов и изделий из них поможет увеличить теплотехнические показатели агрегатов, избежать слабых мест в футеровке, которыми, например, являются швы в штучной кладке из легковесных теплоизоляционных кирпичей. Также, применение теплоизоляционных бетонов может снизить удельный расход огнеупоров на тонну готовой продукции за счет низкой плотности материала и, как следствие, снижение массы футеровок.

Одним из эффективных огнестойких материалов может являться бетон на основе вспученного вермикулита. Вспученный вермикулит обладает низкой плотностью, теплопроводностью и относительно высокой огнеупорностью. В основном в качестве вяжущих веществ для приготовления вермикулитобетонов используют портландцемент. Изделия на основе портландцемента под воздействием высоких температур склонны к растрескиванию, а при остывании разрушению. В связи с чем, одной из актуальных тем исследований в настоящее время, является подбор альтернативных видов вяжущих веществ для вермикулитобетонов и изучение влияния различного рода добавок на физико-механические свойства данного материала.

1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1.1 Состав жаростойких бетонов

Жаростойкими бетонами называют смеси огнеупорных заполнителей и вяжущих, которые при затвердевании превращаются в камнеподобный материал, способный при длительном воздействии высоких температур сохранять заданные механические свойства. По предельно допустимой температуре применения жаростойкие бетоны делятся на класс от И2 до И18 с температурой применения от 200 до 1800 °С соответственно.

Обычно жаростойкие бетоны производят на связке из гидравлически твердеющего глиноземистого, либо высокоглиноземистого цемента. Но, также, в качестве вяжущих компонентов часто применяют портландцемент с различными добавками, шлакопортландцемент, керамические связки, фосфаты и силикаты натрия.

Основные виды заполнителей жаростойких бетонов и предельно допустимая температура их применения представлены в таблице №1 [26].

Таблица №1 – Основные виды заполнителей жаростойких бетонов

Предельно допустимая температура применения, °С	Вид вяжущего	Заполнитель
600	портландцемент, шлакопортландцемент	Гранулированный шлак
700	портландцемент, шлакопортландцемент, жидкое стекло	Доменные отвалы шлаки, диабазовый, базальтовый, диоритовый, андезитовый

Продолжение таблицы 1

Предельно допустимая температура применения, °С	Вид вяжущего	Заполнитель
800	портландцемент, шлакопортландцемент, глиноземистый цемент, жидкое стекло с кремнефтористым натрием	бой глиняного кирпича, шлаковая пемза, топливные шлаки, золошлаковая смесь, литой шлак, вспученный перлит и вермикулит, керамзит
900	портланд-, шлакопортландцемент	аглопоритовый
1000	жидкое стекло с кремнефтористым натрием, портландцемент	Лом шамотных бетонов на жидком стекле, шамотный лом, вспученный вермикулит, керамзит, асбест
1100	портландцемент, жидкое стекло с нефелиновым шламом или саморассыпающимися шлаками, глиноземистый цемент	Лом шамотных бетонов на портландцементе, карборунд, кордиерит, вспученный перлит, вспученный вермикулит, керамзит, асбест
1200	глиноземистый цемент, жидкое стекло с нефелиновым шламом или саморассыпающимися шлаками	отходы обогащения асбеста, предельный феррохром, шамотный лом, лом шамотных бетонов на жидком стекле
1300	глиноземистый цемент, ортофосфорная кислота 50% концентрации	шамотный лом, муллитокордиеритовый, бой легковесного шамота

Окончание таблицы 1

Предельно допустимая температура применения, °С	Вид вяжущего	Заполнитель
1400	высокоглиноземистый цемент, ортофосфорная кислота 70% концентрации	шамотный лом, титаноглиноземистый, магнезитовый
1500	глиноземистый цемент	муллитокорундовый
1600	жидкое стекло с отвердителями, высокоглиноземистый цемент	периклазошпинельные, хромоглиноземистый шлак
1700	высокоглиноземистый цемент	корунд
1800	ортофосфорная кислота 70% концентрации	корунд

С каждым годом число материалов, применяемых в качестве наполнителей продолжает увеличиваться, т.к. всякий огнеупорный безусадочный материал может использоваться в качестве заполнителя.

Кроме жаростойких бетонов с хорошей огнеупорностью и жаропрочностью, изготавливают легкие жаростойкие бетоны, применяемые в качестве теплоизоляционных материалов, а также, для выполнения зон, где требуется облегченная конструкция. В качестве наполнителей для легких огнеупорных бетонов используют многопористые легковесные материалы такие как: легковесный шамот, пеноглинозем, вермикулит, перлит, диатомит минеральные волокна и т.д.

В основном, в жаростойкие бетоны в качестве гидравлически твердеющей связки вводят цемент, поэтому содержание связки в бетонной массе ограничивается пределами, при которых сохраняется оптимальная способность увлажненной бетонной смеси к укладке, зависящая от ее текучести, налипания, сцепления и способности к укладке. Из-за того, что гидравлические вяжущие вещества являются усадочными, то их вводят в бетонную смесь в минимально возможном количестве. Большое содержание гидравлически твердеющей связки приводит к неправильному зерновому составу смеси, а после высыхания – к пористой структуре бетона и, как следствие, к снижению его прочности.

1.2 Свойства жаростойких бетонов

Важными характеристиками, которыми должны обладать жаростойкие бетоны являются быстрое твердение при нормальных температурах, плавная потеря прочности при нагревании до температур разложения продуктов твердения, а затем ее увеличение при более высоких температурах в результате частичного спекания, термостойкость, огнеупорность, малая усадка при сушке и обжиге, высокая температура начала деформации под нагрузкой.

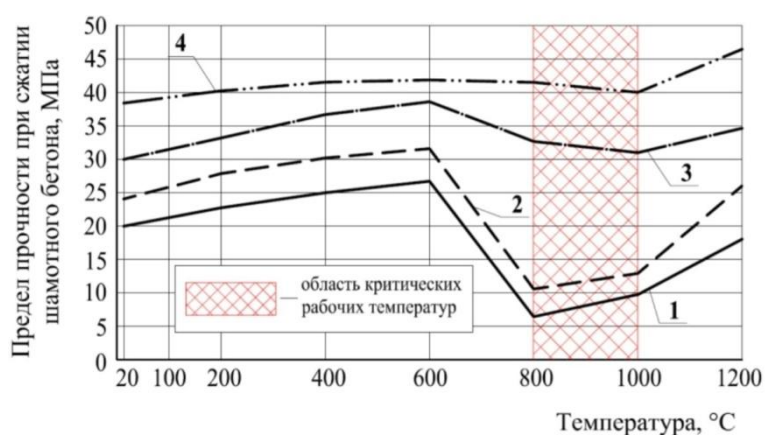
Твердение большинства видов жаростойких бетонов происходит при нормальной температуре. Бетон на глиноземистом цементе очень быстро твердеет, приобретая необходимую прочность. После выдержки в течение суток его прочность составляет до 90 % от проектной. Однако процесс гидратации сопровождается повышением температуры, поэтому необходимо принимать меры для предотвращения испарения воды. На продолжительность твердения значительное влияние оказывает температура среды.

Прочность бетона создается за счет сцепления заполнителя с глиноземистым цементом. Она зависит от количества вносимого вяжущего.

При излишнем количестве цемента снижается огнеупорность, увеличивается коэффициент термического расширения. Прочность искусственного камнеподобного материала также зависит и от свойств заполнителя – его твердости, прочности, максимального размера зерен распределения зернистости.

Прочность как жаростойких, так и обычных строительных бетонов изменяется под действием гидратации цемента – зависит от водоцементного отношения. Для достижения прочности достаточно небольшого количества добавляемой воды, но слишком малое количество жидкости затворения приводит к неполному увлажнению смеси и, как следствие, потере прочности. Большое количество воды также отрицательно сказывается на прочности бетона.

Жаростойкие бетоны являются так называемой безобжиговой твердеющей жаростойкой массой, которая не имеет стабильной керамической связи, подобно огнеупорным изделиям и поэтому изменяет свою структуру и свойства при нагреве. На рисунке 1 представлена прочность шамотного жаростойкого бетона на различных видах вяжущих веществ в зависимости от температуры нагрева образцов [27].



(1 – портландцемент с тонкомолотым шамотом; 2 – глинозёмистый цемент; 3 – жидкое стекло; 4 – фосфатные связующие.)

Рисунок 1 – Прочность при сжатии шамотного бетона в зависимости от температуры обжига и вида вяжущего

Наибольшая потеря прочности цементных бетонов наблюдается при температуре 800 – 1100 °С, что связано с разрушением цементной гидравлической связки в результате обезвоживания. Вода, связанная в продуктах гидратации цемента на 80 % выделяется при температурах 300 – 400 °С, остаточное количество воды удаляется при нагреве до 1000 °С. Поэтому необходимо постепенно увеличивать температуру нагрева бетона до 400 °С и далее, до полного его обезвоживания. При удалении связанной воды в теле бетона образуются мелкие поры и увеличивается общая открытая пористость. При нагреве бетона выше 1100 °С начинается спекание и прочность вновь увеличивается. При высоких температурах в бетоне возникает жидкая фаза, которая при охлаждении затвердевает и увеличивает прочность бетона при нормальных температурах. Следовательно, после нагрева бетона до высоких температур его прочность при нормальной температуре увеличивается [27].

Жаростойкие бетоны обладают низкой газопроницаемостью. Обычно, газопроницаемость бетонов меньше, чем многих огнеупорных изделий. Самая низкая газопроницаемость во время службы бетонов наблюдается в охлажденных местах футеровки в том случае, когда продукты гидратации цемента еще не разложились.

Бетоны на глиноземистом цементе обладают высокой стойкостью к воздействию сульфатов и, кроме того, устойчивостью к серной и соляной кислоте в случае, если их рН больше 3, что достигается ввиду отсутствия выделения несвязанной извести при образовании гидравлически твердеющих связей, однако, следует учитывать, что в вяжущем веществе содержатся соединения извести.

1.3 Теплоизоляционные жаростойкие бетоны

Теплоизоляционными жаростойкими бетонами называют легкие жаростойкие бетоны со средней плотностью до 1200 кг/м³, приобретающие

теплоизоляционные свойства после твердения, служащие под воздействием высоких температур. Теплоизоляционные бетоны обычно служат при температурах ниже 1000 °С, их средняя (кажущаяся) плотность 0,4 – 0,8 г/см³, теплопроводность при 400 °С 0,1 – 0,2 ккал/(м ч °С). Легкие жаростойкие бетоны, которые служат при температурах выше 1000 °С, имеют среднюю (кажущуюся) плотность 0,9 – 1,3 кг/см³, теплопроводность при 400 °С 0,2 – 0,3 ккал/(м ч °С).

Легкие жаростойкие бетоны разделяют по их теплоизоляционным показателям на группы А и В. Легкие жаростойкие бетоны разделяют при одной и той же температуре службы на бетоны, которые имеют небольшую среднюю (кажущуюся) плотность и прочность, и бетоны, имеющие высокую среднюю (кажущуюся) плотность.

При изготовлении легких жаростойких бетонов необходимо введение несколько большего количества воды, чем при изготовлении плотных обычных огнеупорных бетонов, так как легковесные огнеупорные заполнители, из-за высокой пористости, впитывают значительное количество жидкости. Следует иметь в виду, что если гидравлически вяжущего вещества окажется недостаточно, то необходимо учитывать снижение прочности и других свойств бетона.

1.3.1 Основные вяжущие материалы, используемые для производства жаростойких теплоизоляционных бетонов

1. Портландцемент.

Портландцемент представляет собой тонкоизмельченный цементный клинкер, получаемый обжигом до спекания смесей, содержащих 75–78 % мас. СаСО₃ (известняк, мел, ракушечник, туф) и 22–25 % мас. глинистого компонента (глины, глинистые сланцы, лёсс). Ценным сырьем для производства портландцемента являются мергели – природные смеси известняка и глины.

По прочности на сжатие в 28- суточном возрасте портландцемент подразделяют на марки 400, 500, 550 и 600, портландцемент быстротвердеющий на марки 400 и 500. Допускается выпускать портландцемент с активными минеральными добавками марки 300. Предел прочности цементного камня при изгибе и сжатии должен соответствовать значениям, указанным в таблице 3 [3].

Таблица 3– Физико-механические показатели портландцемента

Обозначение цемента	Гарантированная марка	Предел прочности, МПа			
		При изгибе в возрасте, сут		При сжатии в возрасте, сут	
		3	28	3	28
ПЦ-Д0, ПЦ-Д5, ПЦ-Д20	300	-	4,4	-	29,4
	400		5,4		39,2
	500		5,9		49,0
	550		6,1		53,9
	600		6,4		58,8
ПЦ-Д20-Б	400	3,9	5,4	24,5	39,2
	500	4,4	5,9	27,5	49,0

Химический состав клинкера колеблется в сравнительно широких пределах. Несмотря на сложный минеральный состав (портландцементный клинкер представлен силикатами, алюминатами и алюмоферритами кальция), химический состав клинкера принято выражать массовой долей (%) оксидов. Таким образом, «главными» оксидами цементного клинкера являются оксид кальция CaO , оксид кремния SiO_2 , оксид алюминия Al_2O_3 и оксид железа Fe_2O_3 , суммарное содержание которых достигает обычно 95–97 %. Кроме них в состав клинкера в небольших количествах (в виде различных соединений и в качестве изоморфных примесей) могут входить оксид магния MgO , серный ангидрид SO_3 , диоксид титана TiO_2 , оксид хрома Cr_2O_3 , оксид марганца Mn_2O_3 , оксиды щелочных металлов Na_2O и K_2O , фосфорный ангидрид P_2O_5 , оксид бария BaO . Обычно содержание этих оксидов в

клинкере колеблется в следующих пределах: CaO 63–66 %; SiO₂ 21–24 %; Al₂O₃ 4–8 %; Fe₂O₃ 2–4 %; MgO 0,5–5 %; SO₃ 0,3–1 %; Na₂O + K₂O 0,4–1 %; TiO₂ + Cr₂O₃ 0,2–0,5 %; P₂O₅ 0,1–0,3 %.

Портландцементный клинкер представлен четырьмя основными «искусственными» минералами: 3CaO · SiO₂ (сокращенно C₃S), 2CaO · SiO₂ (C₂S), 3CaO · Al₂O₃ (C₃A), 4CaO · Al₂O₃ · Fe₂O₃ (C₄AF). В заводских клинкерах все эти минералы содержат изоморфные примеси, поэтому следует различать, например, C₃S и C₂S, получаемые в лабораторных условиях из химически чистых компонентов, и твердые растворы на их основе: алит и белит, – образующиеся в цементном клинкере. Состав обычных портландцементных клинкеров колеблется в пределах: C₃S – 45–60 %; C₂S – 20–30 %; C₃A – 3–15 %; C₄AF – 10–20 %. Суммарное содержание указанных минералов в клинкерах большинства заводов составляет 96–97 %. Таким образом, 75–82 % от массы клинкера приходится на долю минералов-силикатов C₃S + C₂S, обеспечивающих собственно вяжущие свойства, и 18–25 % – на долю минералов-плавней C₃A + C₄AF, обеспечивающих достаточное количество жидкой фазы в процессе обжига.

Основным недостатком применения портландцемента в жаростойких бетонах является значительное (большее, чем на других цементах) снижение прочности цементного камня в интервале температур от 600 до 800 °С, также, в связи с протеканием вторичной гидратации свободного оксида кальция при каждом цикле охлаждения, жаростойкие бетоны на основе ПЦ имеют ощутимо низкие показатели термостойкости. Данные факты приводят к более низким эксплуатационным показателям жаростойких бетонов на основе ПЦ, в сравнении с другими вяжущими веществами (ГЦ, ВГЦ, фосфатные, силикатные) и к относительно невысокой максимально возможной температуре применения таких бетонов.

2. Глиноземистый и высокоглиноземистый цемент.

Алюминатный цемент - быстротвердеющее гидравлическое вяжущее вещество, продукт тонкого измельчения клинкера, получаемого обжигом (до плавления или спекания) сырьевой смеси, состоящей из бокситов и известняков.

По содержанию Al_2O_3 цементы делят на глиноземистый, высокоглиноземистый I, высокоглиноземистый II, высокоглиноземистый III. Химический состав цементов представлен в таблице 2 [1].

Таблица 2 – Химический состав алюминатных цементов

Вид цемента	Содержание оксидов, %						
	Al_2O_3 , не менее	CaO ¹	Fe_2O_3 ²	SiO_2	MgO	SO_3	TiO_2 *
	Не более						
ГЦ	35,0	-	-	-	-	-	-
ВГЦ I	60,0	32,0	1,0	3,0	1,5	2,0	0,05
ВГЦ II	70,0	28,0	1,0	1,5	1,0	2,0	0,05
ВГЦ III	80,0	18,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,05

¹ – Рекомендуемые значения;

² – Содержание оксида железа представляет собой сумму Fe_2O_3 и FeO , пересчитанных на Fe_2O_3 .

Характерными для алюминатных цементов химическими соединениями, клинкерными минералами, обеспечивающими гидравлическое схватывание и твердения являются алюминаты кальция. В зависимости от соотношения $CaO:Al_2O_3$ в системе $CaO - Al_2O_3$ образуются такие минералы как C_3A , $C_{12}A_7$, CA , CA_2 и CA_6 .

Трехкальциевый алюминат является одним из характерным минералов портландцементного клинкера, в составе глиноземистых цементов не встречается. Двенадцатикальциевый семиалюминат имеет стабильную и

нестабильную модификации. Стабильная форма имеет кубическую симметрию, плотность $2,7 \text{ г/см}^3$, твердость 5 по шкале Мооса, выкристаллизовывается при температуре $1455 \text{ }^\circ\text{C}$. Нестабильная модификация образуется из быстро охлажденного расплава в форме игольчатых кристаллов, имеет более высокую плотность, в процессе нагрева переходит в стабильную форму. Однокальциевый алюминат относится к многоклинной сингонии. Его структура состоит из тетраэдров (AlO_4) и атомов кальция, нерегулярно координированных с шестью или семью атомами кислорода. Диалюминат кальция имеет двусосные положительные кристаллы с малым углом между оптическими осями. Гидратируется медленно, при повышенной температуре реакция взаимодействия с водой ускоряется. Однокальциевый шестиалюминат состоит из 8% CaO и 92% Al_2O_3 . Гексагональная кристаллическая решетка, плотность $3,42 - 3,51 \text{ г/см}^3$. Структура аналогична структуре β – глинозема. Оптические свойства близки к свойствам корунда, кристаллизуется в виде однородных пластин с отрицательным удлинением. Данный минерал не гидратируется при обычных температурах, поэтому его наличие в глиноземистом цементе снижает прочность цементного камня [2].

Высокоглиноземистые цементы на 85-90 % состоят из диалюмината кальция ($\text{CaO } 2\text{Al}_2\text{O}_3$), также в небольших количествах содержат алюминат кальция ($\text{CaO } \text{Al}_2\text{O}_3$) и $2\text{CaO } \text{Al}_2\text{O}_3 \text{ SiO}_2$ (геленит) [19].

Основной составляющий минерал высокоглиноземистого цемента (CA_2) отличается медленным взаимодействием с водой, при повышении температуры реакции гидратация протекает быстрее. Температура плавления составляет $1760-1790 \text{ }^\circ\text{C}$. Гидратационная структура данного минерала характеризуется низкой прочностью в первые сутки твердения, но затем происходит быстрый набор прочности и к 3 суткам твердения она составляет около 50 МПа, к 7 суткам – 85 МПа, а к 28 суткам уже 140 МПа [2].

В высокоглиноземистых цементах алюмината кальция содержится незначительное количество, в связи с чем, бетоны на данном цементе не отличаются быстрым набором прочности в первые сутки твердения [2]. Геленит слабо взаимодействует с водой образуя гелеобразную массу, растворяется в соляной кислоте, является нежелательным минералом в составе высокоглиноземистого цемента.

3. Шлакощелочное вяжущее.

Шлакощелочное вяжущее представляет собой активированный тонкомолотый гранулированный шлак.

Поскольку гидравлическая активность стекловидного шлака значительно выше, нежели закристаллизованного, его гранулируют. Грануляция шлака производится быстрым охлаждением расплава мокрым, либо полусухим методами.

Для грануляции шлака мокрым методом расплав из шлаковых чаш сливают в бассейн с водой, благодаря чему достигается его быстрое охлаждение и распадение на мелкие гранулы. Существенным недостатком мокрого способа грануляции является высокая влажность получаемого продукта и, как следствие, увеличение массы материала и большие затраты на его сушку.

Полусухой способ грануляции осуществляют в барабанных, гидроударных, гидрожелобных и других установках, за счет чего достигается более низкая влажность получаемого сырья, в сравнении с мокрым методом. С целью снижения расхода воды и понижения влажности шлака в установки для грануляции через сопло при помощи вентиляторов подают воздух.

Гранулированный тонкомолотый шлак слабо гидратируется в обычных условиях. Для его твердения необходима щелочная активация шлака. Щелочи вводят при приготовлении бетонных смесей в виде водных

растворов. Для активации шлаков применяют щелочи натрия и калия, соду, поташ, жидкое стекло [20].

Для производства шлакощелочного вяжущего подходят как кислый, так и основной гранулированные шлаки, но стоит учитывать, что чем выше основность шлаков, тем более высокие эксплуатационные показатели достигаются у бетонов.

Растворы на основе шлакощелочного вяжущего при нормальных условиях твердения достигают прочности 25 – 30 МПа, а при тепловлажностной обработке в течении 8 -12 часов при температуре 90 – 95 °С прочность может достигать 35 – 60 МПа в зависимости от свойств шлаков, расхода вяжущего и используемого щелочного компонента.

4. Жидкое стекло.

Жидкое стекло является коллоидным раствором SiO_2 в щелочах. По химическому составу оно соответствует растворимым в воде натриевым и калиевым солям кремниевой кислоты. Химическая формула жидкого стекла соответствует виду $\text{R}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$, где R – натрий или калий.

Наиболее распространено натриевое жидкое стекло ввиду экономичности и доступности сырья. Сырьем для производства жидкого стекла является обычный кварцевый песок или аморфный кремнезем, в качестве щелочного компонента вводят кальцинированную и каустическую соду, поташ, сульфат натрия.

Производят жидкое стекло сухим и мокрым способами. Сухой метод основывается на получении расплава щелочных силикатов и последующего его охлаждения. При медленном охлаждении образовывается силикат-глыба, при быстром охлаждении стекло растрескивается и получается гранулят. Для получения жидкого стекла силикат-глыбу, либо гранулят растворяют в теплой воде под давлением. При мокром способе производства жидкого

стекла его получают непосредственно путем растворения кремнезема в растворах едких щелочей под давлением [19].

Жидкое стекло является щелочным силикатным вяжущем веществом. Твердение бетонов на его основе происходит благодаря выделению геля ортокремниевой кислоты, обладающего вяжущими свойствами.

Одним из положительных свойств жидкого стекла является его клеящая способность. Клеящую способность жидкое стекло приобретает благодаря агрегации молекул силикатов натрия из-за дегидратации [28].

Самостоятельно жидкое стекло твердеет медленно, поэтому, для ускорения твердения, в состав бетонов на основе жидкого стекла вводят отвердители. В качестве отвердителей чаще всего используют кремнефтористый натрий (Na_2SiF_6) нефелиновый шлам и саморассыпающиеся шлаки в результате силикатного распада. Требования к химическому составу отвердителей представлены в таблице 4 [26].

Таблица 4 – Химический состав отвердителей жидкого стекла

Отвердитель	Требования
Кремнефтористый натрий	содержание Na_2SiO_6 не менее 93 %
Нефелиновый шлам	CaO – 50-55%, SiO_2 – 25-30%, FeO менее 4 %, Al_2O_3 менее 5 %, п.п.п. не более 4,5%. Удельная поверхность не менее 2500 $\text{см}^2/\text{г}$
Саморассыпающиеся шлаки в результате силикатного распада	CaO – 40-50%, SiO_2 – 25-30%, Fe_2O_3 + FeO менее 1 %, Al_2O_3 – 4-8 %, других примесей не более 20%. Удельная поверхность не менее 3000 $\text{см}^2/\text{г}$

1.3.2 Основные заполнители, используемые в жаростойких теплоизоляционных бетонах

Для приготовления теплоизоляционных жаростойких бетонных смесей используются мелкий, крупный заполнители и тонкомолотые добавки. Тонкомолотыми добавками служат тонкоизмельченные или пылевидные материалы: хромитовая руда, бой магнезитового или шамотного кирпича, кусковой шамот, цемянка, андезит, пемза, гранулированный доменный шлак, лёссовый суглинок и зола-унос; для легких жаростойких бетонов — бой шамотного или диатомового кирпича, цемянка, керамзит и зола-унос. В качестве мелкого (от 0,15 до 5 мм) и крупного (от 5 до 25 мм) заполнителей применяются дробленые материалы: титано-глиноземистый шлак, дунит, хромитовая руда, бой магнезитового магнезитохромитового, высокоглиноземистого или шамотного кирпича, кусковой шамот, бой полукислого, талькового и обыкновенного глиняного кирпича, доменный отвальный шлак, базальт, диабаз, андезит, арктический туф [4].

В качестве заполнителей для легких жаростойких бетонов в настоящее время широко используется вспученный вермикулит и керамзитовый гравий, которые отличаются низкой теплопроводностью, жаростойкостью и малым удельным весом. Керамзитовый гравий изготавливается из глинистых сланцев и легкоплавких глин вспучиванием во вращающихся печах. Вспученный вермикулит представляет собой термообработанный гидротированный алюмосиликат магния и калия биотинитовой слюды. Он состоит из кристаллов, которые в процессе термообработки расщепляются по плоскостям спайности, увеличиваясь в объеме в 15-20 раз. Вспученный вермикулит, обладает уникальными сочетаниями свойств: малой объемной массой (125-150 кг/м³), низкой теплопроводностью не более 0,15 Вт/(м*К) при 1000 °С, огнеупорностью до 1350 °С [5]. Как показывает опыт использования вермикулита в изготовлении футеровок, добавление даже небольшого его количества ведет к повышению теплотехнических свойств,

что может существенно уменьшить удельный вес жаростойких бетонов и существенно снизить затраты на их изготовление.

1.4 Производство вспученного вермикулита

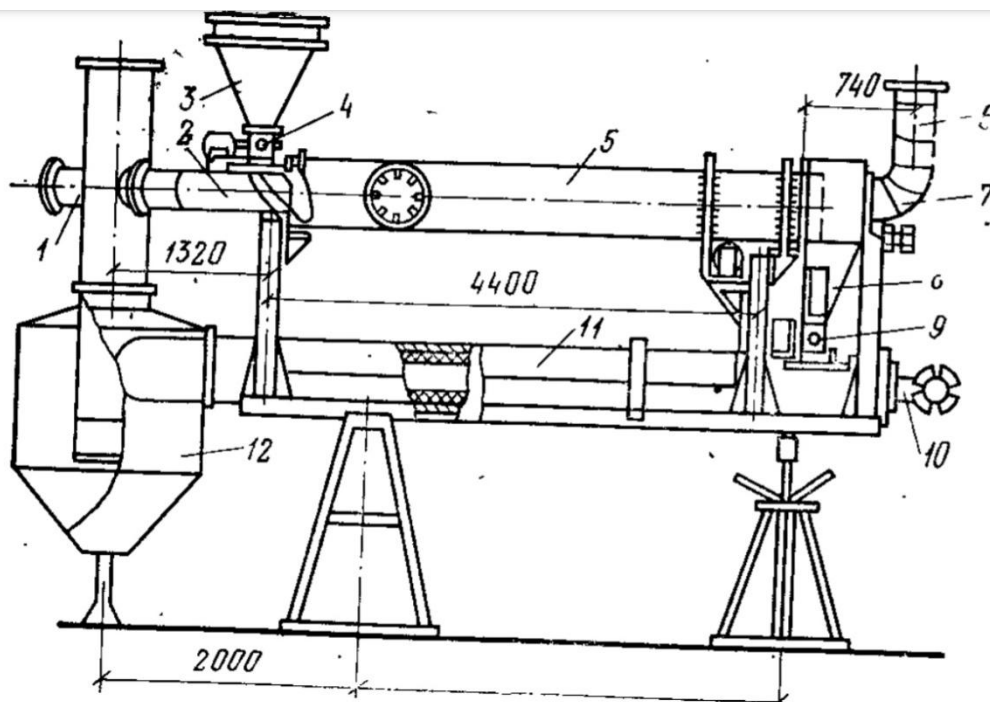
Технологическая цепочка получения вспученного вермикулита включает в себя операции по добыче руды, ее обогащению, дробления вермикулита до необходимого зернового состава и обжигу.

Вспучивание вермикулита происходит в несколько стадий. Первый эндотермический эффект при обжиге сырья происходит в интервале температур 150 – 200 °С, он связан с удалением адсорбционной воды. Следующий значительный эндотермический эффект наблюдается в интервале температур от 240 до 280 °С. Он происходит из-за удаления воды, связанной с обменными ионами. Третий, малозаметный эндоэффект, наблюдается при температуре от 400 до 700 °С и он связан с выделением цеолитной воды. Последний эндотермический эффект происходит при температуре 710 – 840 °С, который связан с удалением кристаллизационной воды [24].

Обжиг вермикулита производят в шахтных и туннельных печах. При обжиге в шахтных печах сырье подается сверху и попадает в поток горячих восходящих газов, поступающих снизу печи. Далее, вспученный вермикулит, через наклонный под попадает в бункер хранения готового продукта. Существенным недостатком данного способа обжига является то, что мелкие частицы вермикулита дольше задерживаются в печи, чем мелкие, в связи с чем получается неоднородный продукт с разной степенью вспучивания.

При обжиге вермикулита в трубчатой печи подогретое сырье подается в горизонтальную футерованную трубу с горящим факелом. Благодаря потокам воздуха и газов уже вспученный вермикулит попадает в осадательный бункер, после которого установлен сепаратор, отделяющий готовый продукт от пустой породы. Мелкие частицы вспученного

вермикулита оседают в циклоне [25]. Схема трубчатой печи для вспучивания вермикулита представлена на рисунке 2.



(1 – всасывающий воздухопровод; 2 – подающий воздухопровод; 3 – загрузочный бункер; 4,9 – барабанный питатель; 5 – сушильный барабан; 6 – вытяжная труба; 7 – вентилятор; 8 – бункер для сухого сырца; 10 – форсунки; 11 – трубчатая печь; 12 – циклон)

Рисунок 2 – Схема трубчатой печи обжига вермикулита

1.5 Теплоизоляционные жаростойкие бетоны на основе вермикулита

Одним из важнейших и необходимых материалов, применяемых в условиях службы при высоких температурах, является теплоизоляционный жаростойкий бетон и изделия на его основе. Применение бетонов данного вида помогает увеличить теплотехнические свойства агрегатов и защитить несущие конструкции от воздействия высоких температур. В качестве заполнителей для теплоизоляционных жаростойких бетонов должны применяться относительно дешевые материалы с низкой плотностью, теплопроводностью и достаточно высокой огнеупорностью. Одним из таких заполнителей является вспученный вермикулит. Благодаря свойствам

данного минерала, его применение в теплоизоляционных бетонах приводит к значительному снижению плотности бетонов на основе вермикулита и, как следствие, к снижению затрат на их производство.

Применение вермикулита в качестве заполнителя для жаростойких теплоизоляционных бетонов особенно актуально в условиях Челябинской области. На Южном Урале имеется действующее Потанинское месторождение вермикулита, которое находится в Каслинском районе Челябинской области. Также, в нашем крае находится большое скопление промышленных предприятий, на которых множество агрегатов с высокими рабочими температурами. Эксплуатация данных агрегатов требует применение высокоэффективных теплоизоляционных материалов, одним из видов которых являются жаростойкие теплоизоляционные бетоны.

На сегодняшний день множество авторов изучали свойства различных видов вермикулитобетонов с применением различных добавок и вяжущих.

В Томском политехническом университете проводились исследования вермикулитовых бетонов и вермикулитовых изделий на связке из глины. Для приготовления образцов применялся вермикулит Тебинского месторождения.

В ходе исследования вермикулитового бетона изготавливались образцы трех видов по вермикулито-цементному отношению: 50:50 %, 40:60 % и 30:70 %. Использовался портландцемент марки Цем I-42,5Н. После испытаний образцов отмечено, что с увеличением количества вермикулита в шихте увеличивается водоцементное отношение, снижается плотность и прочность образцов. Так, для образцов с содержанием вермикулита 30% плотность составляла $1,02 \text{ кг/см}^3$, прочность – 2,7 МПа, для образцов с содержанием вермикулита 50% плотность составляла $0,76 \text{ кг/см}^3$, прочность – 1,4 МПа.

Для исследования образцов вермикулитовых изделий на связке из глины приготавливалась сырьевая смеси в соотношении 3 части вермикулита

и 1 часть глины. Изделия на связке из легкоплавкой глины обжигались при температуре 900 °С, из тугоплавкой – при 1000, 1050, 1100 °С. После проведения эксперимента выявлено, что плотность образцов находилась приблизительно на одном уровне и составляла 0,70 кг/см³. Предел прочности при сжатии зависил от температуры обжига изделий и составлял 1,2 МПа для образцов термообработанных при температуре 900 °С и 4,9 МПа для образцов, обожженных при температуре 1100 °С [6]. Известно, что бетоны на связке из портландцемента склонны к значительному снижению прочности под воздействием высоких температур и низким срокам эксплуатации в условиях попеременного нагревания и охлаждения.

В Сибирском федеральном университете проводились исследования по разработке состава вермикулитобетона на основе вспученного вермикулита Татарского месторождения. В качестве вяжущего вещества применяли портландцемент марки 400. В ходе испытаний изготавливались образцы кубы со стороной 70 мм с соотношением вермикулита и цемента 1:2,5; 1:5; 1:7,5 и 1:9. Также, в качестве добавки-платификатора вместе с водой затворения вводили пластификатор «Центромент» в количестве 0,8 % от массы вяжущего вещества. Бетонную смесь перемешивали в гравитационном смесителе. Образцы подвергались определению предела прочности на сжатие в возрасте 28 суток и плотности.

Максимальный предел прочности на сжатие составил 3,14 МПа у образцов с цементновермикулитовым соотношением 1:2,5. Прочность образцов вермикулитобетона других составов была менее 1 МПа. Минимальная прочность составила 0,31 МПа у образцов с максимальным содержанием вермикулита. В ходе испытаний отмечено, что чем больше содержание вермикулита в образцах, тем меньше их прочность и плотность. Плотность образцов варьировалась от 385 кг/м³ до 813 кг/м³ и увеличивалась с уменьшением количества вермикулита в образцах. Состав с соотношением цемента и вермикулита 1:2,5 относится к конструкционно-

теплоизоляционным бетонам, а составы с соотношением 1:5 и 1:7,5 к теплоизоляционным.

В Гродненском государственном университете имени Янки Купал, в рамках научно-исследовательской работы по созданию огнезащитного состава на основе вспученного вермикулита и портландцемента, проводились исследования по влиянию соотношения вермикулита и цемента на подвижность смеси и прочность на сжатие образцов. В ходе работ изготавливались образцы с отношением вермикулита и портландцемента 0,25:1; 0,5:1; 0,75:1. Водоцементное отношение выбиралось по критерию оптимальной подвижности приготовленной смеси и возрастало с увеличением количества содержания вермикулита в составе смеси. Вермикулитоцементное отношение 0,75:1 не использовалось при проведении дальнейших экспериментов, ввиду явной недостаточности вяжущего вещества.

С целью модификации составов, также, были изготовлены образцы-кубы с добавлением пластификатора, либо клея ПВА. В ходе испытаний образцов на прочность при сжатии отмечено, что применение пластифицирующей добавки позволяет увеличить прочность вермикулитобетона в 1,5-2,5 раза, в зависимости от количества вермикулита в сухой смеси, и снизить количество воды затворения до 10 %. Введение клея ПВА в качестве добавки позволило получить еще больший прирост прочности образцов.

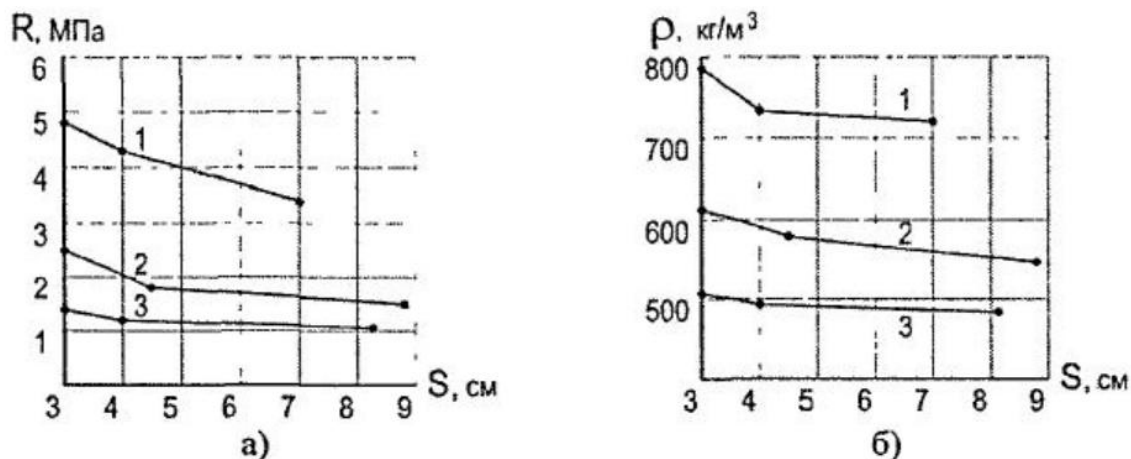
Дальнейшие испытания опытных образцов на огнестойкость показали, что наиболее длительное время воздействия пламени паяльной лампы способен выдержать состав без каких-либо добавок [10]. Наименьшее время воздействия пламени выдержал раствор с добавлением клея ПВА. В следствие чего, можно сделать вывод, что введение пластификатора и клея ПВА в состав вермикулитобетона на основе портландцемента увеличивают

исходную прочность образцов, но ускоряют потерю прочности образцов под воздействием высоких температур.

С целью улучшения эксплуатационных показателей вермикулитобетона на основе портландцемента, снижения потерь прочности в условиях работы под воздействием высоких температур и увеличения термостойкости в состав таких бетонов необходимо вводить тонкомолотые добавки, содержащие SiO_2 и Al_2O_3 , способствующие снижению содержания свободного оксида кальция в цементном камне, который приводит к разрушению бетонов на портландцементе.

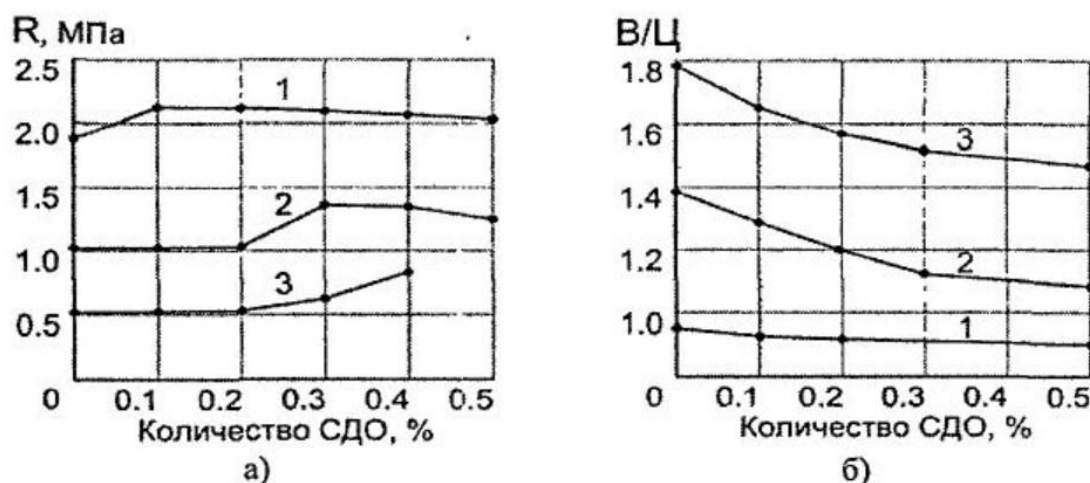
В Кабардино-Балкарском государственном университете проводились исследования огнестойких теплоизоляционных вермикулитовых бетонов. В ходе исследования изготавливались образцы вермикулитобетона с отношения портландцемента к вермикулиту 1:2, 1:3 и 1:4. В ходе экспериментов выявлено, что методом виброформования можно получать вермикулитобетоны со средней плотностью 0,47-0,50 г/см³, удовлетворяющие необходимым качеством их укладки. При снижении средней плотности образцов огнезащитные свойства бетона на основе вермикулита не повышались, а необходимая распалубная прочность не набиралась. В ходе исследования было выявлено, что физико-механические показатели вермикулитобетона всех составов значительно зависят от подвижности смеси (рисунок 3).

С целью улучшения физико-механических показателей вермикулитобетона были проведены дальнейшие исследования по влиянию воздухововлекающей добавки СДО (смола древесная омыленная) на свойства бетона. При содержании СДО 0,3-0,4 % от массы портландцемента водоцементное отношение для вермикулитобетона значительно снизилось. Предел прочности при сжатии и при изгибе образцов после пропарки увеличился на 10-63 % в зависимости от состава. Средняя плотность уменьшилась на 4-9 % (рисунок 4)



(1- цемент: вермикулит (по объему) – 1:2; 2- того же состава 1:3; 3 – того же состава 1:4)

Рисунок 3 – Зависимость прочности на сжатие (а) и средней плотности (б) вермикулитобетона от состава и подвижности (S) смеси



(1- цемент: вермикулит по объему) – 1:2; 2 – того же состава 1:3; 3 – того же состава 1:4)

Рисунок 4 – Зависимость прочности на сжатие вермикулитобетона после пропаривания (а) и $В/Ц$ смеси (б) от количества добавки СДО

Так как известно, что цементный камень на основе портландцемента не является стойким к воздействию высоких температур и разрушается после нагрева до температуры $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ и последующего охлаждения, были проведены исследования по замене части портландцемента золой и отходами пиления вулканического туфа (туфовым песком). При добавлении данных

добавок в количестве о 20 % по массе и более приводило к снижению прочностных характеристик вермикулитобетона. При этом отмечено снижение плотности образцов при одинаковом расходе воды. После пропаривания отмечено более значительное снижение прочностных показателей образцов [7].

В Санкт-Петербургском государственном архитектурно-строительном университете проводились исследования по влиянию условий твердения образцов, изготовленных из вермикулитобетона, на их свойства. Также, проводились исследования по влиянию добавки натриевого жидкого стекла на свойства вермикулитобетона. В качестве заполнителей для исследуемых смесей применялись песок и вспученный вермикулит, добавок - зола-уноса ТЭЦ, вяжущего вещества – портландцемент. Смесей изготавливались с различным соотношением компонентов. В ходе эксперимента установлено, что наибольшая прочность образцов (6-12 МПа) достигается при их твердении в условиях тепло-влажностной обработки при давлении пара 0,8 МПа. Также, установлено, что применение золы-уноса в качестве добавки позволяет значительно снизить расход цемента, а добавка натриевого жидкого стекла способствует стабилизации микропор и улучшает теплофизические свойства бетона[9]. Стоит отметить, что ввиду добавления песка отмечалась относительно высокая плотность смеси выше представленного состава, что приводит к увеличению теплопроводности и, как следствие, к снижению изоляционных свойств материала.

Известно, что жаростойкие вермикулитовые бетоны при нагреве до высоких температур склонны к значительным огневым усадкам. В институте химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В.Тананаева кольского научного центра РАН проводились исследования по снижению усадочных деформаций вермикулитобетона с помощью добавок в сырьевую смесь вспучивающихся материалов. В качестве такой добавки был использован вермикулитовый концентрат Ковдорского

месторождения, который под действием высоких температур способен многократно увеличиваться в размерах. В качестве микронаполнителя бетона использовался тонкомолотый шамот с содержанием Al_2O_3 34%. Для исследований использовался вермикулитовый концентрат фракции 0.315-0.63 мм насыпной плотностью 782 кг/м³ в количестве от 10 до 25 % от массы цемента. Образцы вермикулитобетона после режимов твердения и сушки помещались в муфельную печь и нагревались до 150, 200 и 250 °С, соответственно, где выдерживались 4 часа, после чего замерялась их усадка. Затем образцы обжигались в силитовой печи до максимально возможной температуры эксплуатации (1000 °С).

Таким образом, за счет предварительной сушки вермикулитобетона при 200°С и введения более 10% вермикулитового концентрата удается снизить огневую усадку до показателей менее 2%, а при введении вермикулитового концентрата в количестве 20% - до 1.43%. Стоит учитывать, что при увеличении количества вермикулитового концентрата в сырьевой смеси наблюдается снижение прочности образцов, так, при содержании концентрата 10% от массы цемента, прочность образцов составляла 2,05 МПа, при содержании 25% прочность составляла 1,42 МПа [8].

Одним из видов вяжущего, применяемого для производства жаростойких теплоизоляционных материалов, является жидкое стекло. В Российском физико-химическом университете имени Д.И. Менделеева проводились исследования по созданию теплоизоляционного бетона из вермикулита на вспененном натриевом жидком стекле. В качестве отвердителя жидкого стекла использовался Гексакремнефторид натрия (Na_2SiF_6). В качестве наполнителей, помимо вермикулита, использовали маршалит, волластанит и синтетический муллит. Вспенивание жидкого стекла производили при помощи добавления ПАВов и взбивания массы миксером. В ходе исследований было выявлено, что наилучшими

прочностными характеристиками обладал состав с содержанием вермикулита 27% от суммы масс жидкого стекла и других наполнителей. Масса затворялась жидким стеклом с плотностью 1,481 г/см³, вспененного до коэффициента 2. Коэффициент вспененности определялся по разности между высотой столба взбитого жидкого стекла и жидкого стекла в спокойном состоянии. Предел прочности при сжатии вермикулитового бетона данного состава в возрасте твердения 3 суток составил около 1,4 МПа, плотность – 0,55 г/см³. Причем, увеличение коэффициента вспененности жидкого стекла приводило к разупрочнению составов. Разбавление жидкого стекла приводит к увеличению хрупкости материала и снижению несущей способности самой пены [12].

Применение вспученного вермикулита в сочетании с жидким стеклом, при условии оптимального подбора компонентов смеси, позволило получить теплоизоляционный материал с оптимальными эксплуатационными показателями. Однако, стоит учитывать, что бетонные смеси на связке из жидкого стекла обладают низким сроком «живучести» смеси, что сильно ограничивает время изготовления из них изделий.

Одним из немаловажных составляющих бетона, влияющих на физико-механические свойства искусственного камня является заполнитель. В Уфимском государственном нефтяном техническом университете проводились исследования по подбору оптимального соотношения керамзита и вермикулита в теплоизоляционном жаропрочном бетоне, предназначенном для службы при температуре до 1000 °С. В ходе испытаний были изготовлены образцы жаропрочного бетона в виде кубов с длиной ребра 100 мм. Перед испытанием образцы просушивались до постоянной массы при температуре 110±50 °С, после чего проводились эксперименты при повышенных температурах, а именно для 200, 400, 600 и 1000 °С. Образцы изготавливались с соотношением керамзита и вермикулита равным 1; 2,5; 3,2; 4,5; 6. Результаты исследований показывают, что увеличение массового

соотношения керамзит-вермикулит более, чем в 2,5 раза повышает прочностные свойства бетонов в 1,5-1,7 раза, водопоглощение снижается практически вдвое и достигает значения 0,6-0,8 %. Проанализировав результаты проведенных экспериментов можно сделать вывод о том, что наилучшим сочетанием свойств обладает жаростойкий бетон с массовым соотношением керамзит-вермикулит равным 2 [5]. Однако, увеличение содержания керамзита приводит к увеличению плотности бетона и увеличению теплопроводности, хоть и увеличивает прочностные свойства, из-за чего снижается количество возможных мест применения данной бетонной смеси.

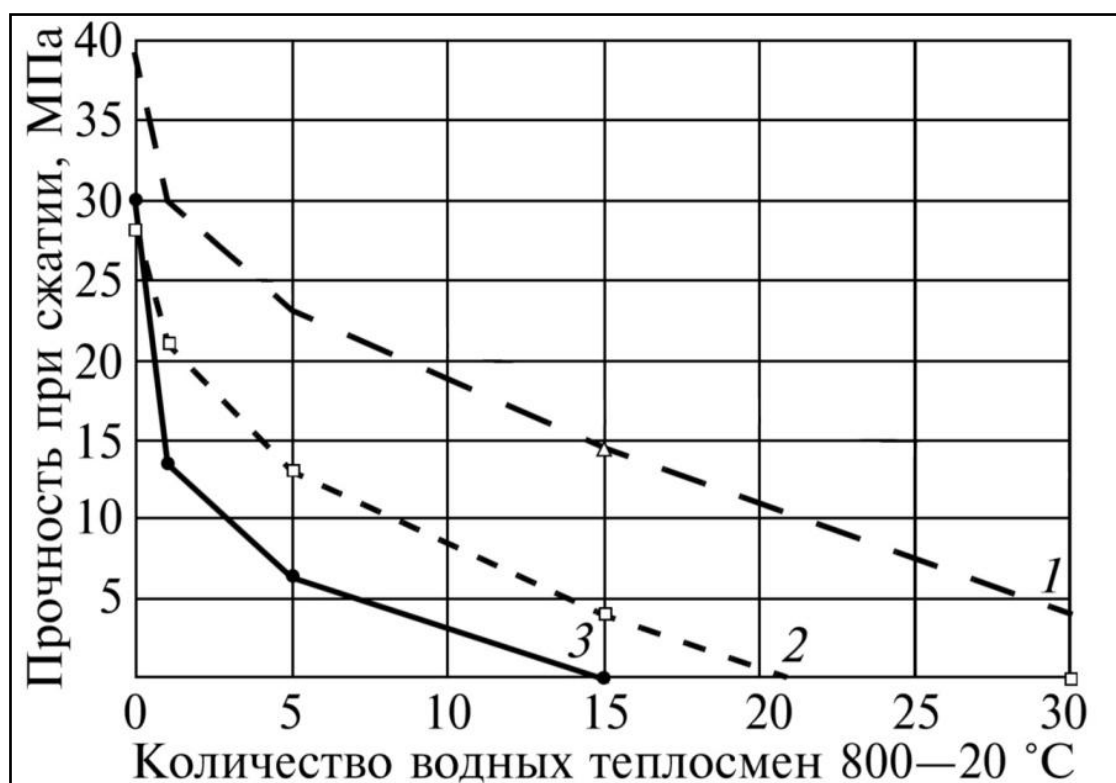
В настоящее время множество вермикулитовых изделий изготавливаются на керамической связке. Так, например, по технологии разработанной институтом «УралНИИСтром» изготавливаются керамические вермикулитовые изделия плотностью от 0,4 до 1,0 г/см³. Одним из наилучших изделий в условиях службы с температурой до 1100 °С является керамовермикулит марки 450. Его плотность составляет 0,45-0,50 г/см³, прочность при сжатии от 1,4 МПа, теплопроводность при 500 °С – 0,185 Вт/м · К. Данные изделия уже много времени успешно применяются для теплоизоляции агрегатов многих отечественных предприятий по производству алюминия [11]. Одним из недостатков керамовермикулитовых изделиях в сравнении с изделиями на гидравлическом вяжущем является необходимость для их производства наличия высокотехнологичного оборудования, а именно прессов и обжиговых печей. Также, одним из преимуществ вермикулитобетона является возможность его приготовления непосредственно на месте проведения футеровочных работ и изготовление бесшовных конструкций.

Легкие жаростойкие теплоизоляционные бетоны эффективно используются в промышленности. Одним из таких видов бетонов является вермикулитобетон. На его основе изготавливают множество жаростойких

обмазок и растворов, торкрет-бетонов и легковесных изделий. Проводится множество исследований по подбору оптимального состава заполнителей данного вида бетона, изучению влияния различных добавок на физико-механические свойства вермикулитобетона, армированию растворов на его основе. Чаще всего в качестве вяжущего для приготовления бетонов на основе вермикулита используют портландцемент. Бетоны на основе портландцемента склонны к значительному разупрочнению в интервале температур от 600 до 900 °С, что связано со структурными преобразованиями в цементном камне. Низкая прочность бетонов на основе портландцемента при температурах выше 600 °С приводит к ограничению возможности их применения и низким срокам службы в условиях попеременного охлаждения и нагревания.

Основными минералами, образующимися при твердении алюминатных цементов являются алюминаты кальция, обладающие высокой гидравлической активностью, что приводит к относительно высокому набору прочности в ранние сроки твердения. Основным преимуществом алюминатных цементов в сравнении с портландцементом является отсутствия образования свободного оксида кальция при твердении цементного камня. Именно образование данного оксида в свободной форме, в основном, является причиной разупрочнения цементного камня портландцемента под воздействием высоких температур. По данным К.Д. Некрасова прочность цементного камня глиноземистого цемента при температуре 400 °С снижается на 35 % от первоначальной прочности. При дальнейшем нагреве прочность снижается незначительно и при нагреве до температуры 800 °С составляет 55-60 % от первоначальной прочности [13]. Температура применения бетонов, в качестве вяжущего вещества в которых использован глиноземистый цемент составляет 1300-1400 °С. Одним из существенных недостатков глиноземистого цемента является отсутствие возможности тепловлажностной обработки бетонов на его основе, ввиду значительного разупрочнения цементного камня по причине образования

шестиводного трехкальцевого алюмината при температуре твердения бетона выше 25-30 °С. Данный недостаток также ограничивает возможность применения глиноземистого цемента при проведении работ в условиях температур выше 25 °С. Вышеописанные ограничения не относятся к высокоглиноземистым цементам с содержанием Al_2O_3 выше 70 %. Температура применения бетонов на основе высокоглиноземистого цемента составляет порядка 1500-1700 °С, их прочность и термостойкость выше, нежели бетонов на основе глиноземистого цемента [14]. На рисунке 5 представлен график изменения прочности при сжатии бетонов на основе портландцемента, глиноземистого и высокоглиноземистого цементов в зависимости от количества водных теплосмен [15].



(1- высокоглиноземистый цемент, 2 – глиноземистый цемент, 3 – портландцемент)

Рисунок 5 – Изменение прочности при сжатии жаростойких бетонов на разных видах вяжущего в зависимости от количества водных теплосмен (800 – 20 °С)

В связи с вышеизложенным, одной из актуальных тем исследования в настоящее время может являться изучение влияния замены портландцемента глиноземистым на физико-механические свойства легких вермикулитобетонов.

1.6 Жаростойкие теплоизоляционные ячеистые бетоны

1.6.1 Состав жаростойких теплоизоляционных бетонов

Ячеистыми жаростойкими бетонами называют легкие бетоны, работающие в условиях воздействия высоких температур, основную часть объема которых составляют равномерно распределенные поры в виде ячеек, полученных с помощью газо-, либо пенообразователей [22].

Заполнителями и вяжущими веществами в ячеистых жаростойких бетонах служат те же материалы, что и в обычных теплоизоляционных жаростойких бетонах.

В качестве газообразователя в жаростойкие ячеистые бетоны добавляют алюминиевую пудру. Алюминиевая пудра производится пяти различных марок, основное различие которых в содержании активного алюминия (от 86 до 90 %) и кроющей способности на воде (от 6000 до 10000 см²/г) [29]. Газообразование в ячеистых бетонах происходит в результате взаимодействия алюминия с щелочами, в результате которого происходит выделение водорода. В качестве щелочей чаще всего используют известь (Ca(OH)₂), либо едкий натрий (NaOH).

Одной из основных проблем в производстве газобетона является точная корректировка интенсивности газообразования и сроков схватывания смеси с целью получения однородной пористой структуры. Слишком интенсивное выделение газа может привести к его выходу из смеси в окружающую среду и получению плотного материала. А слишком ранние сроки схватывания приведут к образованию трещин в теле бетона в результате высокого давления газа.

С целью удержания пузырьков газа в теле бетона в его состав вводят добавки ускоряющие схватывание. Ускорители схватывания могут быть щелочными и без щелочными. К щелочным относятся гидросиликаты натрия и калия, алюминат натрия, карбонат калия и другие. В качестве без щелочных добавок применяют различные соли кальция ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$, $\text{Ca}(\text{HCOO})_2$). Применение щелочных добавок в составе бетонов на основе портландцемента может приводить к снижению прочности на поздних сроках твердения и разрушению цементного камня в результате щелочной коррозии. В настоящее время одной из перспективных добавок - ускорителей схватывания и твердения бетонов на портландцементе являются соли лития, так как они не провоцируют щелоче-силикатные реакции в бетоне, а напротив, снижают риск коррозии цементного камня [30]. Добавка солей лития в алюминатные цементы также ускоряет скорость гидратации моноалюмината и диалюмината кальция повышая тепловыделение системы, причем, образования низкопрочного C_3AH_6 не происходит. Основным продуктом гидратации в данном случае является C_2AH_8 с примесью CAH_{10} [2]. Однако, влияние литий содержащих добавок на свойства бетона в настоящее время мало изучено.

1.6.2 Область применения жаростойких ячеистых бетонов

Жаростойкие ячеистые бетоны применяются для тепловой изоляции различных конструкций, служащих под воздействием высоких технологических температур, и повышения теплотехнических показателей высокотемпературных агрегатов.

Из ячеистых бетонов изготавливают как штучные изделия, так и монолитные футеровки. Одним из преимуществ применения данных бетонов для изготовления изделий является отсутствие в необходимости их обжига. Плотность жаростойких ячеистых бетонов варьируется от 400 до 1100 кг/м³.

Допустимая температура применения данных бетонов во многом зависит от вида вяжущего вещества и для портландцементных бетонов находится на уровне 900 °С, жидкостекольных – 1200 °С, глиноземистых – 1300 °С. Предельная температура применения ячеистых бетонов на фосфатных вяжущих и высокоглиноземистых цементах может достигать до 1700 °С [31].

1.7 Выводы по литературному обзору

1. Бетон на основе глиноземистого цемента обладает высокими эксплуатационными показателями и отличается быстрым набором прочности в сравнении со многими другими вяжущими веществами.

2. Вермикулит является одним из наиболее оптимальный материалов, применяемых в качестве заполнителей жаростойких теплоизоляционных бетонов благодаря относительно высокой огнеупорности, низкой плотности и отражательной способности.

3. Для повышения температуры применения вермикулитобетона на глиноземистом цементе целесообразно ввести добавки огнеупорных материалов, близких по составу к ГЦ (например, высокоглиноземистых шлаков алюминотермического процесса).

4. Глиноземистый цемент отличается высокими физико-механическими показателями, но является дорогим цементом. Необходимо, с целью снижения себестоимости продукции, изучить возможность применения цемента, содержащего добавки высокоглиноземистых шлаков.

1.8 Цели и задачи исследования

Целью настоящей работы является изучение свойств вермикулитобетона на основе глиноземистого цемента с добавкой ферротитанового шлака, определение влияния соотношения заполнителя и вяжущего, а также водовермикулитового отношения на физико-механические свойства данного бетона.

Глиноземистый цемент является быстротвердеющим вяжущим веществом, он набирает до 70 % марочной прочности в первые сутки твердения, что делает данный материал особо привлекательным в производстве жаростойких материалов из-за малого количества необходимого времени для получения готового продукта и отсутствия какой-либо термической обработки изделий на его основе.

Для достижения поставленной цели поставлены следующие задачи исследования:

1. Изучение состояния вопроса, основных видов и свойств жаростойких теплоизоляционных бетонов, вяжущих веществ и заполнителей, применяемых для их производства.
2. Изучение основных свойств исходных материалов (глиноземистый цемент, вермикулит, высокоглиноземистый титановый шлак алюминотермического процесса).
3. Определение влияния соотношения глиноземистого цемента и вермикулита и водовермикулитового соотношения на физико-механические свойства бетона.
4. Разработать составы вермикулитобетона на основе глиноземистого цемента, модифицированного высокоглиноземистым титановым шлаком.
5. Разработать составы низкоплотного ячеистого бетона на основе глиноземистого цемента, модифицированного высокоглиноземистым титановым шлаком.
6. Исследовать основные жаростойкие свойства ранее полученного легкого и ячеистого бетона на модифицированном глиноземистом цементе и вермикулитовом заполнителе.
7. Оценка экономической эффективности разработанных материалов.

2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Исходные материалы

В данной работе проведены исследования жаростойкого теплоизоляционного бетона в качестве заполнителя в котором использовался вспученный вермикулит, в качестве вяжущего вещества - глиноземистый цемент с добавкой ферротитанового шлака. Также, проводились исследования ячеистого бетона на основе глиноземистого цемента, в качестве заполнителя в котором использовался шамот.

2.1.1 Вспученный вермикулит Потанинского месторождения

Вспученный вермикулит представляет собой материал, состоящий из тончайших слюдистых пластинок, разделенных прослойками воздуха. В настоящее время в промышленности используется огромное количество теплоизоляционных изделий на основе вспученного вермикулита. Данный материал имеет низкую теплопроводность за счет небольшой плотности и отражательной способности вермикулита.

В работе использовался вспученный вермикулит Потанинского месторождения по причине легкой доступности сырья за счет близкого местонахождения месторождения. Изучение возможности применения данного вермикулита особенно актуально для Южного Урала. Потанинское месторождение находится в Каслинском районе Челябинской области в 7 км от города Касли [16]. Данное месторождение является одним из самых крупных в России и содержит по некоторым оценкам в районе 10-15 млн. т. вермикулита. Потанинское месторождение вермикулита состоит из большого количества рудных тел гидратированного биотита, переслаивающихся с полевошпатовыми породами и миаскитами. Химический состав руды, биотита и вермикулита Потанинского месторождения представлены в таблице 5. В геологической интерпретации под «вермикулитовой рудой» понимается рыхлая сыпучая масса, состоящая из в различной степени

гидратированного биотита, посторонних минералов и мелких обломков пород и образовавшихся в коре выветривания биотит-карбонатных пород [17].

Таблица 5 – Химический состав руды, биотита и вермикулита Потанинского месторождения

Наименование	SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O ₃	TiO ₂
Руда	40,60	0,31	11,53	11,83	3,59	4,33
Биотит	35,22	10,08	6,28	15,07	8,00	5,06
Вермикулит	37,65	15,51	14,72	13,20	5,16	3,40
Наименование	FeO	MnO	CaO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	ппп
Руда	3,02	0,26	7,55	2,51	1,72	4,68
Биотит	15,33	0,34	-	0,68	-	4,44
Вермикулит	1,70	0,25	1,81	0,41	-	6,8

В работе использовался вспученный вермикулит марки 150 среднего фракционного состава по физическим свойствам соответствующий ГОСТ 12865-67 [18].

2.1.2 Глиноземистый цемент

Для исследования использовался глиноземистый цемент марки ГЦ - 35 40 производства ОАО «Пашинского металлургическо – цементного завода» по ГОСТу 969-2019 с содержанием Al₂O₃ не менее 35 %.

В ходе исследования указанного глиноземистого цемента было выявлено, что нормальная плотность цементного теста, по методике определения указанной в ГОСТ 310.3-76 [37], достигается при количестве воды затворения 30,5 % от массы цемента.

Средний предел прочности на сжатие 3-х образцов цементного раствора, изготовленного в соответствии с ГОСТ 969-2019, в возрасте 3-х суток составил 42,3 МПа

Глиноземистый цемент на 80 – 85 % состоит из моноалюминатов кальция (СА). В небольших количествах в нем содержится $12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ и $\text{CaO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$.

Алюминат кальция быстро гидратируется, именно этот минерал обеспечивает быстрый набор прочности глиноземистых цементов.

Гидратационная структура СА характеризуется быстрым набором прочности в ранние сроки твердения и уже по истечении 1 суток прочность составляет 50 МПа, по истечении 7 суток – 75 МПа, затем скорость набора прочности замедляется и к 28 суткам твердения прирост прочности составляет лишь 5 МПа.

CA_2 медленно набирает прочность в первые сутки твердения, но затем происходит быстрый набор прочности. Данный минерал является основным в составе высокоглиноземистых цементов.

Прочность гидратационной структуры C_{12}A_7 по истечении первых суток твердения составляет порядка 35 МПа, затем, к 3 суткам прочность значительно снижается и в последующие сроки твердения происходит небольшой ее прирост.

Рентгенограмма используемого глиноземистого цемента с добавкой ферротитанового шлака в количестве 15% представлена на рисунке 6

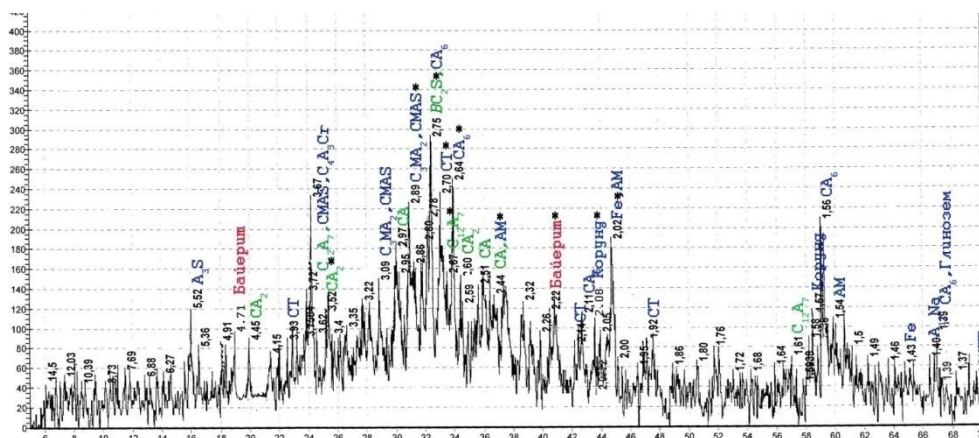


Рисунок 6 – Рентгенограмма ГЦ

В минералогическом составе используемого глиноземистого цемента отмечается незначительное количество гидратически инертных минералов, таких как бонит ($\text{CaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$), металлическое железо (Fe), алюминатномагнезиальная шпинель ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$), перовскит ($\text{Ca} \cdot \text{TiO}_3$) и оксиды титана (TiO , TiO_2 и Ti_2O_3). Наличие данных минералов можно объяснить модификацией используемого глиноземистого цемента с помощью добавки ферротитанового шлака. Их присутствие снижает скорость твердения и прочность цементного камня ГЦ, но увеличивает его огнеупорность.

Также в составе ГЦ прослеживается наличие щелочесодержащего глинозема (Al_2Na), корунда, C_3MA_2 и CMA_3 . Данные минералы также характерны для шлаков производства ферротитана.

В основном, представленный глиноземистый цемент состоит из моноалюминатов кальция ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO}$), диалюминатов кальция ($2 \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO}$) и майенита ($12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$). Данные минералы являются типичными составляющими глиноземистых цементов. Кроме того, в составе цемента присутствует низкотемпературная модификация $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (волластонит).

2.1.3 Шамотный наполнитель

В работе использовался мелкозернистый шамотный наполнитель марки ЗШБ с содержанием Al_2O_3 не менее 28 % производства ООО «Мечел-Материалы» [32].

Данный наполнитель по зерновому составу соответствует требованиям к мелкому наполнителю жаростойких бетонов в соответствии со справочным пособием к СНиП 3.09.01-85 [26].

Зерновой состав наполнителя представлен в таблице 6.

Таблица 6 – Фактический гранулометрический состав шамотного заполнителя

Остаток	№ сита						Проход через 0,16
	2,5	2	1,25	0,63	0,315	0,16	
%	3,9	0,3	15,5	29,3	19,0	19,0	12,8

2.1.4 Алюминиевая пудра

В работе применялась алюминиевая пудра марки ПАП-1 в соответствии с ГОСТ 5494-95 [29].

Пудра вводилась в состав смеси в виде суспензии. Приготовление суспензии производилось в 20 мл воды. С целью улучшения смачиваемости алюминиевой пудры в воду добавляли 1 грамм стирального порошка для удаления парафина с частичек пудры.

Физико-химические свойства алюминиевой пудры представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Физико-химические показатели алюминиевой пудры марки ПАП-1

Марка	Кроющая способность, см ² /г	Остаток на сите №008	Примеси, не более				
			FeO	SiO ₂	Cu	Mn	Влага
ПАП-1	7000	1,0	0,5	0,4	0,05	0,01	0,2

2.1.5 Едкий натр

В работе применялся чешуируванный едкий натр марки ТР с содержанием гидроксида натрия не менее 98,5 % по ГОСТ Р 55064-2012 [33].

Едкий натр вводили в виде раствора, приготовленного в небольшом количестве воды затворения путем перемешивания.

2.1.6 Карбонат лития

Является солью щелочного металла лития и угольной кислоты. Химическая формула Li_2CO_3 . Представляет собой мелкозернистый порошок белого цвета.

Вводился в состав бетонной смеси в сухом виде.

2.2 Методы исследований

Для легких жаростойких теплоизоляционных бетонов основными эксплуатационными показателями являются предел прочности на сжатие в проектном возрасте, остаточная прочность при сжатии после нагрева до рабочих температур, средняя плотность, термостойкость и деформация усадки.

Для проведения всех испытаний вермикулитобетона изготавливались образцы кубы со стороной 70 мм различных составов в соответствии с ГОСТ 10180-2012 и ГОСТ 20910-2019 [21,22]. В первую очередь цемент затворяли расчетным количеством воды. После приготовления цементного теста вводили вермикулит и смесь перемешивали до получения однородного состава. В случае добавки в бетон гидроксида натрия, раствор вводили на последнем этапе приготовления цементного теста. В процессе заполнения форм бетонная смесь уплотнялась методом вибрироформования на вибростоле до равномерного распределения смеси по всему объему формы. Удобоукладываемость вермикулитобетонной смеси в большей мере зависит от водовермикулитового отношения. В вермикулитобетонных смесях водоцементное отношение не характеризует подвижность смеси, так как

вермикулит поглощает большое количество воды. Водопоглощение вспученного вермикулита составляет порядка 400 – 500 % по массе. Время виброуплотнения экспериментальных составов вермикулитобетона с водовермикулитовым отношением 3,4 составляла приблизительно 30 – 45 секунд, 3,6 – 20 – 30 секунд, 4,0 – 15 – 20 секунд. Составы с водовермикулитовым отношением 3,2 уплотнялись методом вибропрессования (виброуплотнение на вибростоле с «пригрузом» площадью 49 см² массой 5 кг).

Для каждого опытного состава вермикулитобетона изготавливалось по 3 образца-куба для определения прочности после сушки до температуры 200 °С, и по 3 образца-куба для определения прочности после обжига до температуры 800 °С и 1100 °С.

С целью исследования ячеистого бетона образцы изготавливали в формах со стороной 100 мм. Глиноземистый цемент и шамотный наполнитель смешивали в сухом состоянии до получения однородной смеси. Затем, производили затворение водой и смешивание ручным методом. После приготовления смеси вводили раствор гидроксида натрия, распределяли его по всему объему массы перемешиванием. На последнем этапе в смесь вводили суспензию алюминиевой пудры, производили контрольное смешивание. В случае введения в состав смеси карбоната лития, порошок добавляли одновременно с алюминиевой пудрой. Заполнение форм готовой смесью производили на 1/3 от объема, уплотнение не выполняли.

Твердение всех опытных образцов проходило в нормальных условиях в течение 3 суток.

2.2.1 Определение предела прочности образцов на сжатие

Проведение испытаний образцов на прочность при сжатии и обработка результатов производились в соответствии с ГОСТ 20910-2019 [22].

Испытаниям было подвергнуто по 3 образца каждого состава после сушки в течение 2-х суток в сушильном шкафу (в первые сутки сушка производилась при температуре 90 °С, во вторые – при 200 °С). Образцы помещались на сушку в возрасте 3-х суток.

2.2.2 Определение остаточной прочности при сжатии после нагрева образцов до рабочих температур

Проведение испытаний образцов на остаточную прочность при сжатии после нагрева до рабочих температур и обработка результатов производились в соответствии с ГОСТ 20910-2019 [22]. Испытаниям было подвергнуто по 3 образца-куба каждого опытного состава.

Испытания проводились на образцах кубах после обжига до температуры 800 °С и 1100 °С.

2.2.3 Определение средней плотности образцов

Определение средней плотности образцов и обработка результатов производились в соответствии с ГОСТ 12730.1-78 [23]. Испытаниям было подвергнуто по 3 образца-куба каждого опытного состава.

2.2.4 Определение термостойкости образцов

Определение термостойкости образцов и обработка результатов производились в соответствии с ГОСТ 20910-2019 [22]. Испытаниям было подвергнуто по 3 образца-куба каждого опытного состава.

Испытанию подвергались образцы после сушки. Термостойкость определяли по воздушным теплосменам. Образцы кубы нагревались в печи до температуры 800 °С и затем охлаждались в течении 20 минут потоком воздуха комнатной температуры. После каждого цикла нагревания и охлаждения образцы визуально осматривались на наличие трещин, выкрашиваний, сколов и взвешивались. За термостойкость бетона принято

количество теплосмен, после которого образца потеряли 20 % от первоначальной массы.

2.2.5 Определение деформации усадки

Определение деформации усадки и обработка результатов производились в соответствии с ГОСТ 20910-2019 [22].

Испытанию на деформацию усадки подвергалось по 3 образца-куба каждого опытного состава после сушки и после обжига. Для определения линейных размеров кубов использовали штатив с индикатором часового типа. Определяли исходные размеры образцов и размеры после их нагрева до температуры 800 °С.

3 ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЧАСТЬ

3.1 Исследование вермикулитобетона на основе глиноземистого цемента с добавкой ферротитанового шлака

Изначально, планировалось проведение испытаний по влиянию добавки – суперпластификатора Metflux 1641F на свойства вермикулитобетона на глиноземистом цементе с добавкой ферротитанового шлака. Но в процессе эксперимента, при введении добавки в разных количествах, ее влияния на водоцементное и водOVERвермикулитовое отношения, либо на удобоукладываемость смеси не выявлено, что можно объяснить высоким водопоглощением вспученного вермикулита (порядка 400 – 500 % по массе), в связи с чем, удобоукладываемость и водопотребность смеси вермикулитобетона, в большей мере, зависят от количества в ее составе вермикулита.

Из-за отсутствия эффекта от введения добавки - суперпластификатора Metflux 1641F было решено провести исследование влияния добавки щелочи на физико – механические свойства вермикулитобетона.

В ходе работы были проведены исследования вермикулитобетона на глиноземистом цементе с добавкой ферротитанового шлака. Ферротитановый шлак является побочным продуктом в производстве ферротитана. Данный шлак содержит 56 - 70 % Al_2O_3 , 10 – 24 % CaO, 8 – 20 % TiO_2 , 2 -5 % MgO, 0,5 – 3 % FeO [35]. Добавка данного сырья в ГЦ позволяет снизить расход цемента, увеличить температуру его применения незначительно снизив прочностные показатели цементного камня. Минеральный состав ферротитановых шлаков представлен в таблице 8 [36].

Таблица 8 – Минеральный состав ферротитановых шлаков

$CaO \cdot 6Al_2O_3 +$ $(Na,K)_2O \cdot 12(Al,Cr)_2O_3, \%$	CaO $2Al_2O_3, \%$	$12CaO$ $7Al_2O_3, \%$	MgO $Al_2O_3,$ %	$CaTiO_3, \%$	Оксиды титана, %
35 - 40	30 - 35	8 – 10	8 – 10	15 - 20	4 - 6

Химический состав и свойства минералов ферротитановых шлаков представлены в таблице 9 [36].

Таблица 9 – Химический состав и свойства минералов ферротитановых шлаков

Минерал	CaO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O+ K ₂ O	MgO	TiO ₂	Температура плавления, °С	Химические свойства
CaO 2Al ₂ O ₃	21,5	78,5	-	-	-	1770	Гидратируется медленно
(Na,K) ₂ O·1 2(Al,Cr) ₂ O ₃	-	95,2	4,8-5,2	-	-	2000	Гидратически инертен
Минерал	CaO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O+ K ₂ O	MgO	TiO ₂	Температура плавления, °С	Химические свойства
CaO·6Al ₂ O ₃	8,4	91,6	-	-	-	1850	гидратически инертен
12CaO 7Al ₂ O ₃	48,5	51,5	-	-	-	1450	Быстро гидратируется
MgO Al ₂ O ₃	-	71,6	-	28,4	-	2135	Инертна ко всем кислотам
CaTiO ₃	40,5	-	-	-	59,4	1970	Растворим в кислотах при нагревании
Оксиды титана	-	-	-	-	100	1750-1890	Не растворяются в кислотах

Температура плавления большинства минералов ферротитанового шлака более 1700 °С. В соответствии с данными представленными в таблице 8 ферротитановый шлак содержит два гидратно активных минерала (CA₂ и C₁₂A₇). Содержание данных минералов в шлаке варьируется от 38 до 45 %. Остальные минералы являются огнеупорными заполнителями. Следовательно, добавка ферротитанового шлака в глиноземистый цемент

увеличивает его огнеупорность, но снижает скорость твердения и прочность. На рисунке 5 представлен график зависимости предела прочности цементного камня ГЦ 35 45 на сжатие в зависимости от количества добавки ферротитанового шлака.

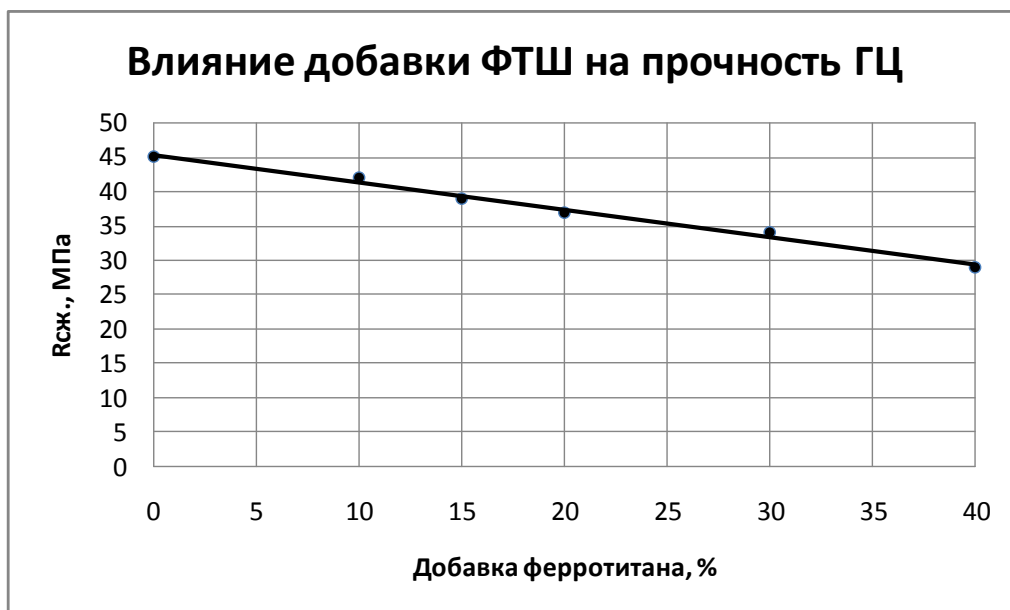


Рисунок 5 – График зависимости предела прочности цементного камня ГЦ на сжатие в зависимости от количества добавки ферротитанового шлака

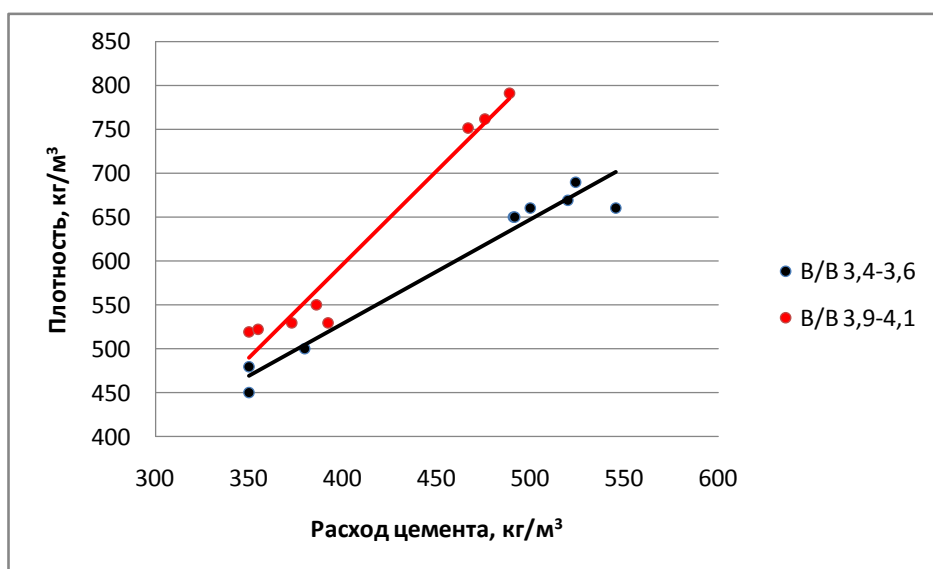
Для проведения исследования было принято решение о введении в глиноземистый цемент добавки ферротитанового шлака в количестве 15 %, что, в соответствии с рисунком 5, снизит прочность цементного камня приблизительно на 13 %, но позволит уменьшить расход цемента и, как следствие, снизит себестоимость готовой продукции.

С целью исследования были разработаны составы вермикулитобетона с различными цементовермикулитовым и водовермикулитовым отношениями.

Образцы-кубы основной массы разработанных составов набирали распалубочную прочность после 1 суток твердения. Однако, поверхность образцов составов с низким расходом цемента и водовермикулитовым отношением после первых суток твердения продавливалась при незначительном силовом воздействии пальцев. Образцы данных составов вынимали из форм на 2 суток твердения. Структура описываемых кубов

характеризовалась наличием крупных, связанных между собой пор. Также, стоит отметить, что указанные составы склонны к выкрашиванию бетона в районе граней кубов при незначительном механическом воздействии. Остальные же составы характеризовались плотной структурой бетона, однако, отмечено, что со снижением водOVERмикулитового отношения увеличивается размер и количество раковин на видимой поверхности образцов. Данный факт также свидетельствует об увеличении пористости образцов со снижением водOVERмикулитового отношения.

В ходе работ экспериментально было выяснено, что оптимальное время уплотнения бетонной смеси на вибростолe варьируется от 30 до 40 секунд, в зависимости от удобоукладываемости смеси. Увеличение времени уплотнения способствует образованию более плотной структуры бетона, что нежелательно для теплоизоляционных изделий. Также отмечено, что виброуплотнение смеси с высоким водOVERмикулитовым отношением в течение более 50 секунд приводит к образованию слоистой структуры бетона, что объясняется «всплытием» частиц вермикулита в верхнюю часть образца, ввиду низкой плотности материала.



(красная линия – водOVERмикулитовое отношение 3,9 -4,1; черная линия – водOVERмикулитовое отношение – 3,4 -3,6)

Рисунок 6 – График зависимости плотности вермикулитобетона в возрасте 3 суток от расхода ГЦ на куб бетонной смеси

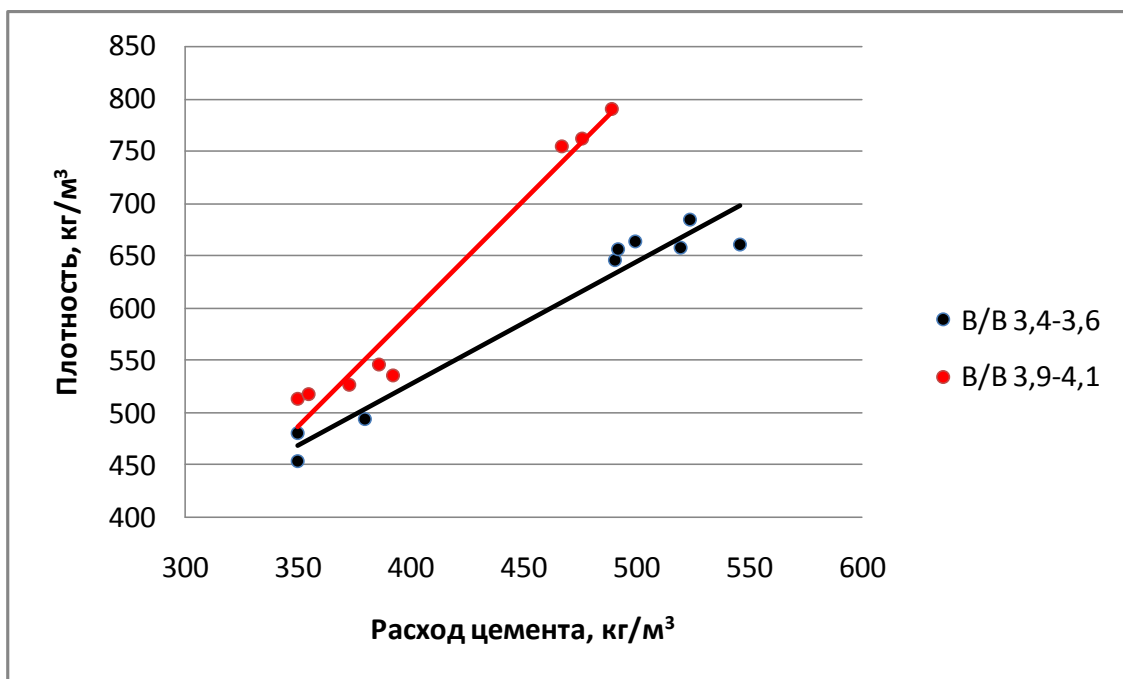
После проведения сушки опытных образцов определялась их плотность. Зависимость плотности от расхода ГЦ на куб бетона представлена на рисунках 6,7.

По графикам, представленным на рисунке 6, видно, что с увеличением водовермикулитового отношения (расхода воды) увеличивается плотность вермикулитобетона. Данный эффект можно объяснить тем, что с увеличением водовермикулитового отношения улучшается удобоукладываемость и подвижность бетонной смеси, что способствует образованию более плотной структуры образцов при уплотнении смеси методом вибролитья даже при небольшом времени вибрирования. Исходя из графиков видно, что между плотностью вермикулитобетона и расходом цемента на куб бетонной смеси имеется линейная зависимость. Графику функции выше представленного вида соответствует уравнение, представленное в формуле 1.

$$p = a \cdot Ц + С, \quad (1)$$

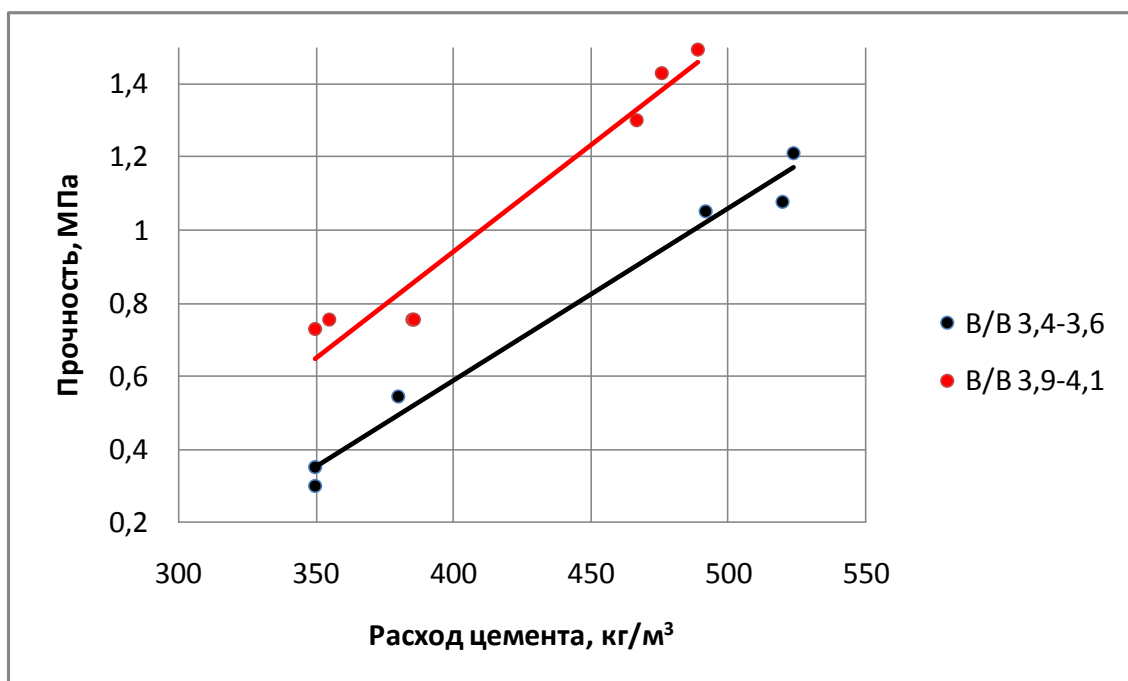
где p – плотность образцов вермикулитобетона после сушки до 200 °С; a , $С$ – постоянные коэффициенты; $Ц$ – расход цемента на м³ смеси.

Решив систему уравнений выше представленного типа для двух различных составов выявлено, что коэффициент a для смеси с водовермикулитовым отношением 3,4 – 3,6 составляет 1,21, для смеси с водовермикулитовым отношением 3,9 – 4,1 коэффициент a составляет 2,26. Коэффициент $С$ для смеси с водовермикулитовым отношением 3,4 – 3,6 составляет 40,2, для смеси с водовермикулитовым отношением 3,9 – 4,1 коэффициент $С$ составляет -312.



(красная линия – водовермикулитовое отношение 3,9 -4,1; черная линия – водовермикулитовое отношение – 3,4 -3,6)

Рисунок 7 – График зависимости плотности вермикулитобетона в возрасте 7 суток от расхода ГЦ на куб бетонной смеси

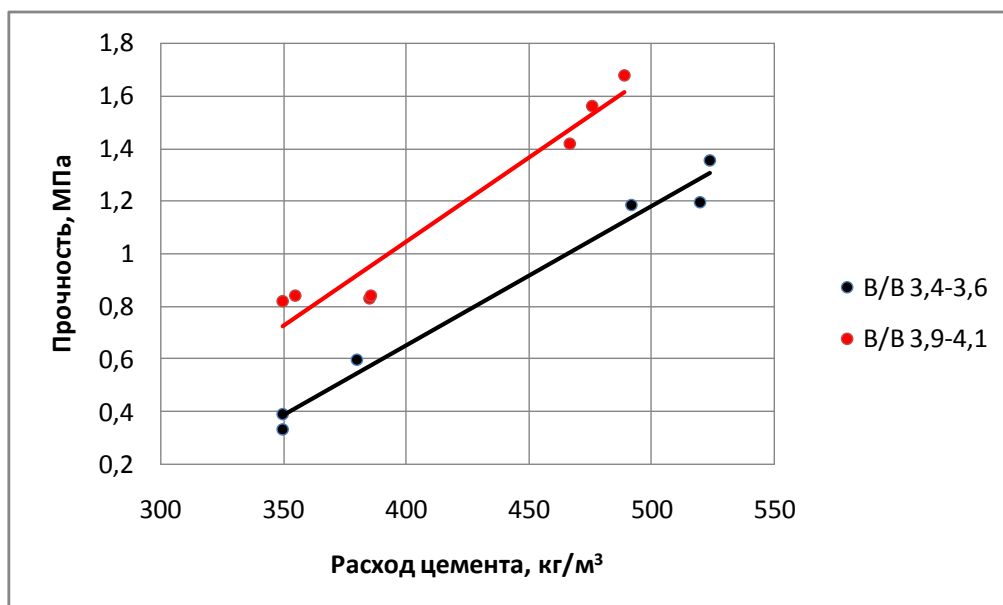


(красная линия – водовермикулитовое отношение 3,9 -4,1; черная линия – водовермикулитовое отношение – 3,4 -3,6)

Рисунок 8 – График зависимости прочности вермикулитобетона в возрасте 3 суток от расхода ГЦ на куб бетонной смеси

В соответствии с графиками, представленными на рисунке 7, плотность вермикулитобетона в возрасте 7 суток находится на уровне плотности образцов в возрасте 3 суток. Характер зависимостей также не меняется.

На рисунках 8,9 представлены графики прочности вермикулитобетона в возрасте 3 и 7 суток соответственно в зависимости от расхода цемента на куб бетона. По графикам, представленным на рисунке 7, видно, что прочность вермикулитобетона увеличивается с увеличением расхода цемента. Также, прочность образцов с повышенным водовермикулитовым отношением выше, чем образцов с В/В отношением 3,4 -3,6 при относительно равных показателях расхода цемента. Данный эффект объясняется улучшением удобоукладываемости смеси при увеличенном расходе воды, что способствует увеличению плотности образцов при укладке смеси методом вибролитья и снижению количества пор.



(Красная линия – водовермикулитовое отношение 3,9 -4,1; черная линия – водовермикулитовое отношение – 3,4 -3,6)

Рисунок 9 – График зависимости прочности вермикулитобетона в возрасте 7 суток от расхода ГЦ на куб бетонной смеси

В соответствии с графиками, представленными на рисунке 9, видно, что характер зависимости предела прочности на сжатие образцов

вермикулитобетона в возрасте 7 суток не меняется, в сравнении с образцами в возрасте 3 суток. Прочность вермикулитобетона в возрасте 7 суток увеличивается приблизительно на 10-15 % в сравнении с возрастам в 3 суток.

Исходя из графиков, представленных на рисунке 8, видно, что между расходом цемента на куб бетонной смеси и прочностью вермикулитобетона имеется линейная зависимость вида, представленного в формуле 2.

$$R_{сж} = a_1 \cdot Ц + C_1, \quad (2)$$

где $R_{сж}$ – прочность вермикулитобетона на сжатие; a_1, C_1 – постоянные коэффициенты; Ц – расход цемента на куб бетонной смеси.

Решив систему уравнений выше представленного типа для двух различных составов определено значение коэффициента a_1 для вермикулитобетона с водOVERвермикулитовым отношением 3,4–3,6 и 3,9 – 4,1 в возрасте 3 суток, который равен 0,0048 и 0,006 соответственно. Коэффициент C для соответствующих водOVERвермикулитовых отношений равен -1,332 и -1,46.

Глиноземистый цемент, используемый в работе включает в себя добавку ферротитанового шлака, который снижает скорость твердения цементного камня и уменьшает прочность в ранние сроки твердения приблизительно на 13 %, но увеличивает его огнеупорность. Из литературных источников известно, что увеличить скорость твердения глиноземистого цемента с добавкой шлака можно благодаря добавке щелочи.

В работе также проведено исследование влияния добавки едкого натра на прочность вермикулитобетона. Добавка гидроксида натрия в глиноземистый цемент также увеличивает его скорость схватывания. Зависимость времени схватывания глиноземистого цемента от количества добавки едкого натра представлена на рисунке 10.

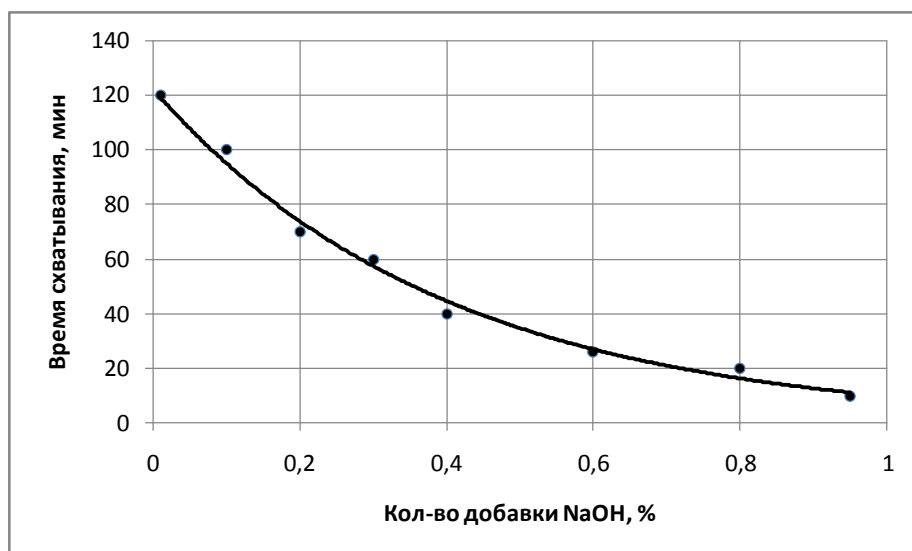
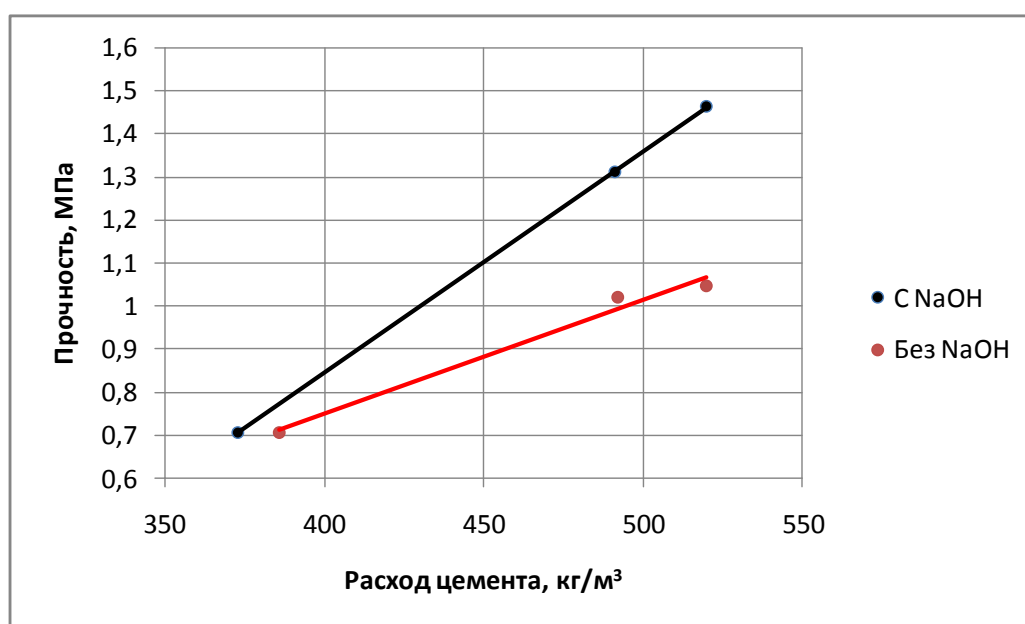


Рисунок 10 – Влияние добавки едкого натра на скорость схватывания глиноземистого цемента

Исходя из графика, представленного на рисунке 10, было решено вводить до 0,8 % едкого натра от массы цемента. Большее количество добавки приведет к схватыванию бетонной смеси менее, чем за 20 минут, что нецелесообразно в условиях производства.



(черная линия – вермикулитобетон с добавкой NaOH; красная линия – вермикулитобетон без добавки NaOH)

Рисунок 11 – Сравнение прочности образцов вермикулитобетона в возрасте 3 суток с относительно одинаковыми водовермикулитовым, водоцементным и цементовермикулитовым отношениями с добавкой раствора едкого натра и без добавки едкого натра

Из рисунка 11 видно, что прочность образцов вермикулитобетона с добавкой едкого натра в количестве 0,8 % от массы цемента в возрасте 3 суток выше прочности образцов без его добавки. Гидроксид натрия позволяет увеличить предел прочности на сжатие вермикулитобетона в возрасте 3 суток приблизительно на 30-40 %.

Из рисунка 12 видно, что предел прочности на сжатие образцов вермикулитобетона с добавкой едкого натра в возрасте 3 суток незначительно выше образцов в возрасте 1 суток. Прирост прочности образцов к 3 суткам в сравнении с 1 сутками составляет примерно 5-10 %. Причем, чем выше расход цемента, тем больше прирост прочности.

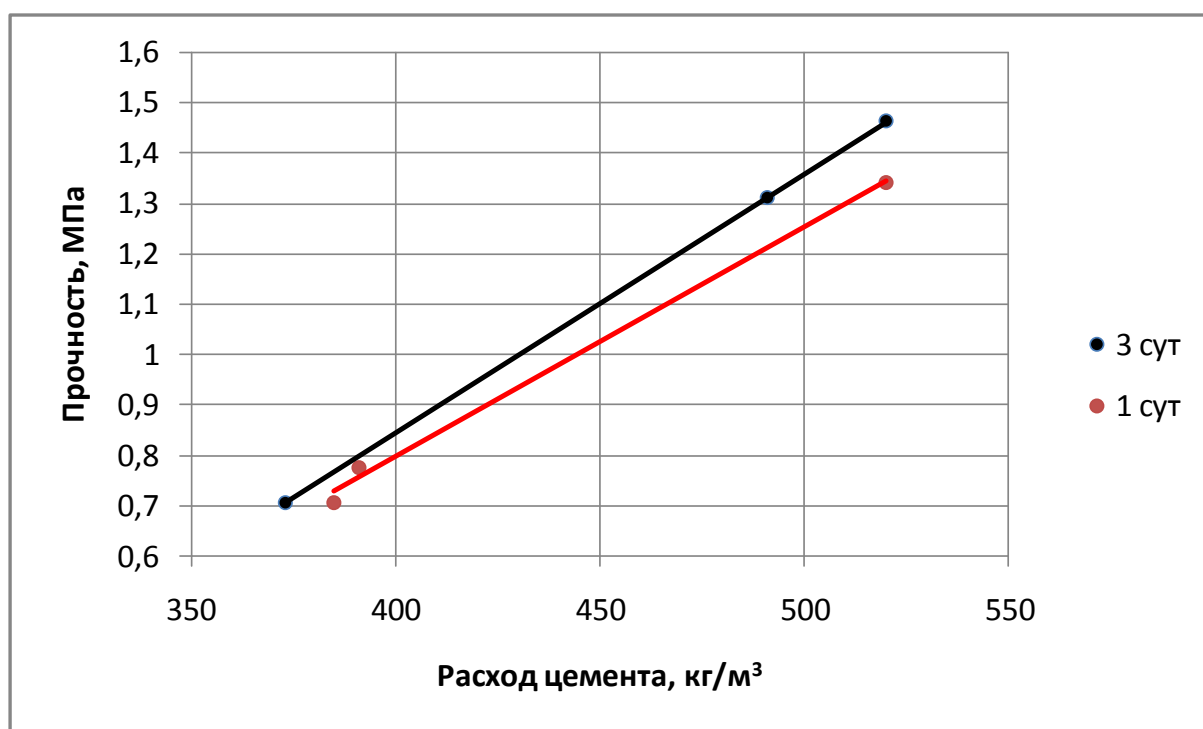


Рисунок 12 – Предел прочности на сжатие образцов вермикулитобетона с добавкой NaOH в возрасте 1 и 3 суток

На рисунках 13-14 представлено изменение плотности образцов вермикулитобетона после сушки до 200 °С и обжига до 800 °С с различным водовермикулитовым отношением в зависимости от расхода цемента.

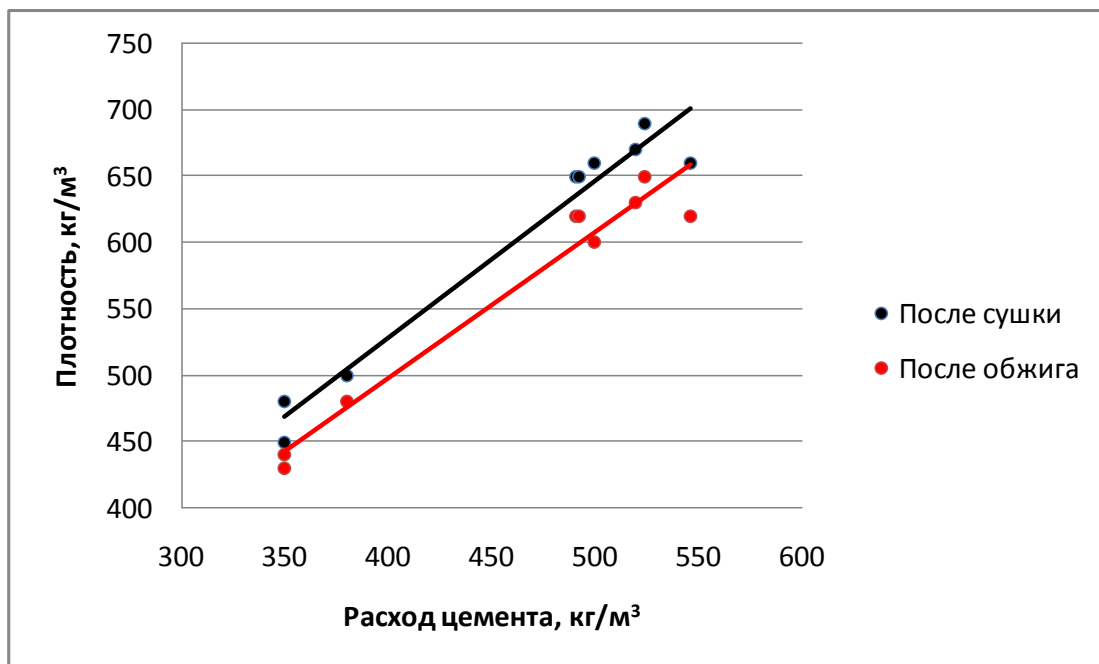


Рисунок 13 – Изменение плотности вермикулитобетона с водOVERМИКУЛИТОВЫМ ОТНОШЕНИЕМ 3,4-3,6 ПОСЛЕ ОБЖИГА ДО 800 °С

Из графика, представленного на рисунке 13 видно, что после обжига до 800 °С плотность вермикулитобетона с водOVERМИКУЛИТОВЫМ ОТНОШЕНИЕМ 3,4-3,6 снижается приблизительно на 5 %, что связано с удалением химически связанной воды.

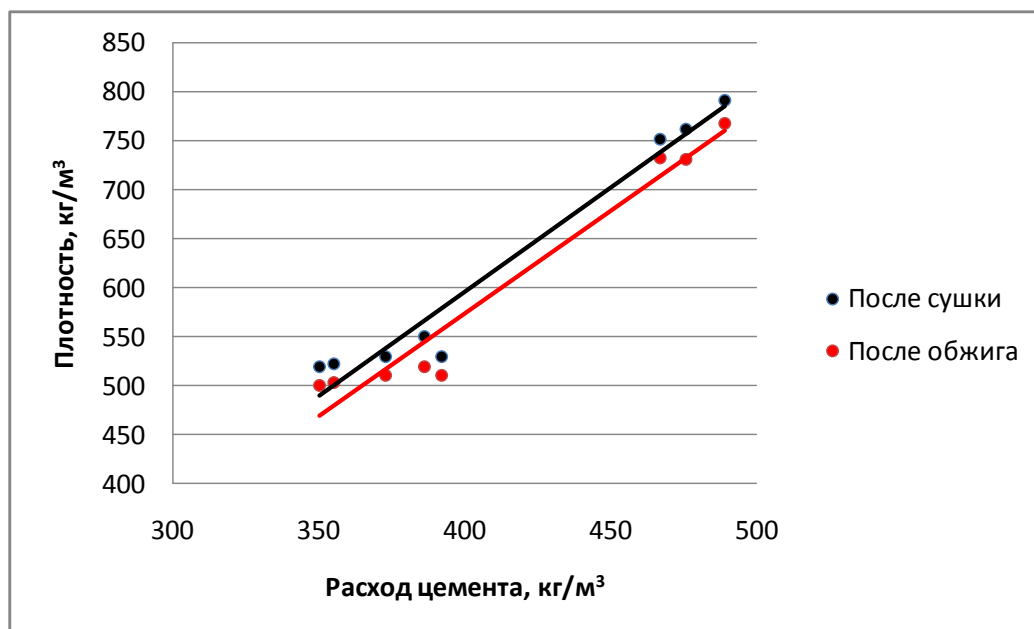


Рисунок 14 – Изменение плотности вермикулитобетона с водOVERМИКУЛИТОВЫМ ОТНОШЕНИЕМ 3,9-4,1 ПОСЛЕ ОБЖИГА ДО 800 °С

Из графика, представленного на рисунке 14 видно, что после обжига до 800 °С плотность вермикулитобетона с водовермикулитовым отношением 3,9-4,0 снижается приблизительно на 3 %, что связано с удалением химически связанной воды.

Из графиков, представленных на рисунках 13,14 видно, что у образцов с водовермикулитовым отношением 3,4-3,6 происходит большее снижение плотности после обжига до 800 °С, чем у образцов с водовермикулитовым отношением 3,9-4,1.

На рисунках 15-16 представлены графики изменения прочности вермикулитобетона после сушки до 200 °С и после обжига до 800 °С с разным водовермикулитовым отношением. Из графиков видно, что менее значительное снижение прочности вермикулитобетона происходит у образцов с более низким расходом цемента.

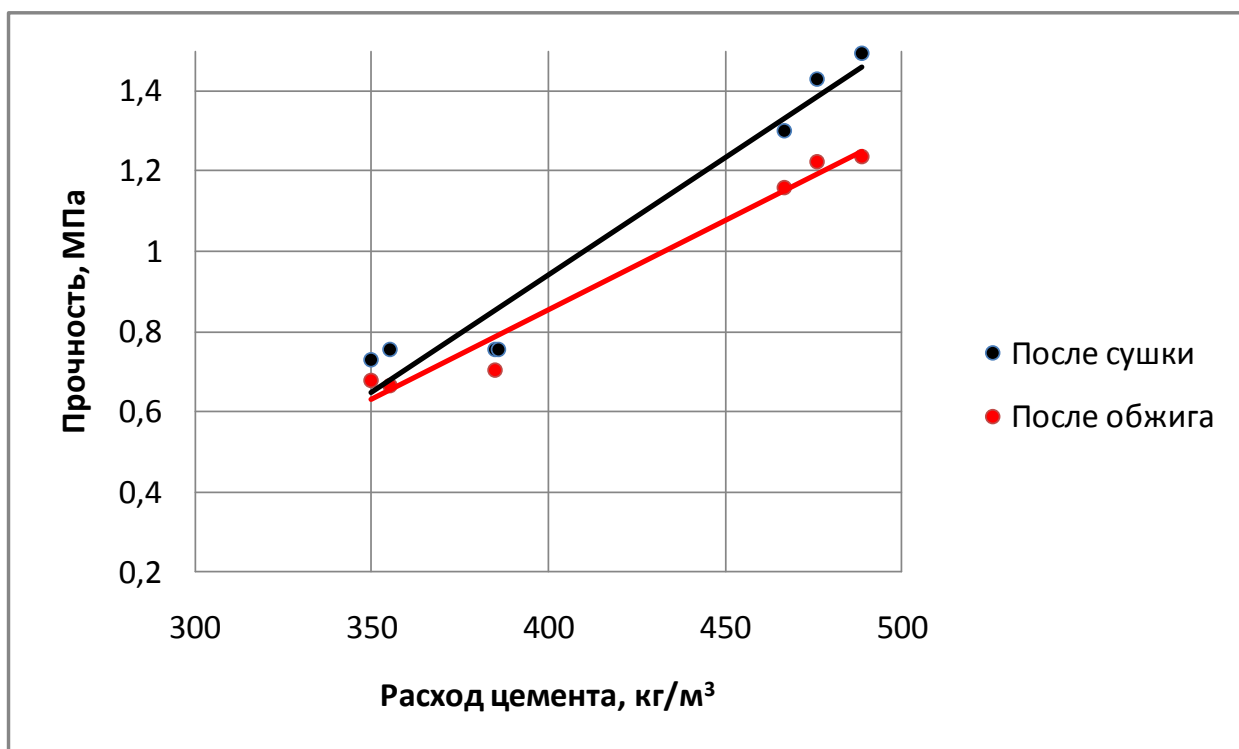


Рисунок 15 – Изменение прочности вермикулитобетона с водовермикулитовым отношением 3,4-3,6 после обжига до 800 °С

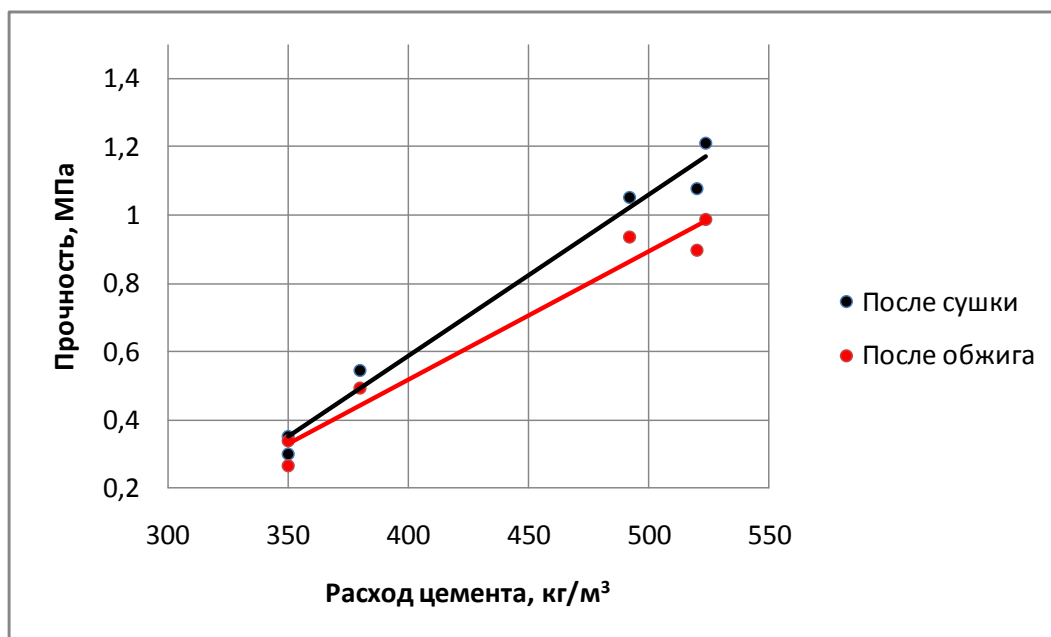


Рисунок 16 – Изменение прочности вермикулитобетона с водовермикулитовым отношением 3,9-4,1 после обжига до 800 °С

Из графика, представленного на рисунке 17 видно, что значительного снижения прочности вермикулитобетона с добавкой раствора едкого натра в количестве 0,8 % от массы цемента после обжига образцов до 800 °С не происходит.

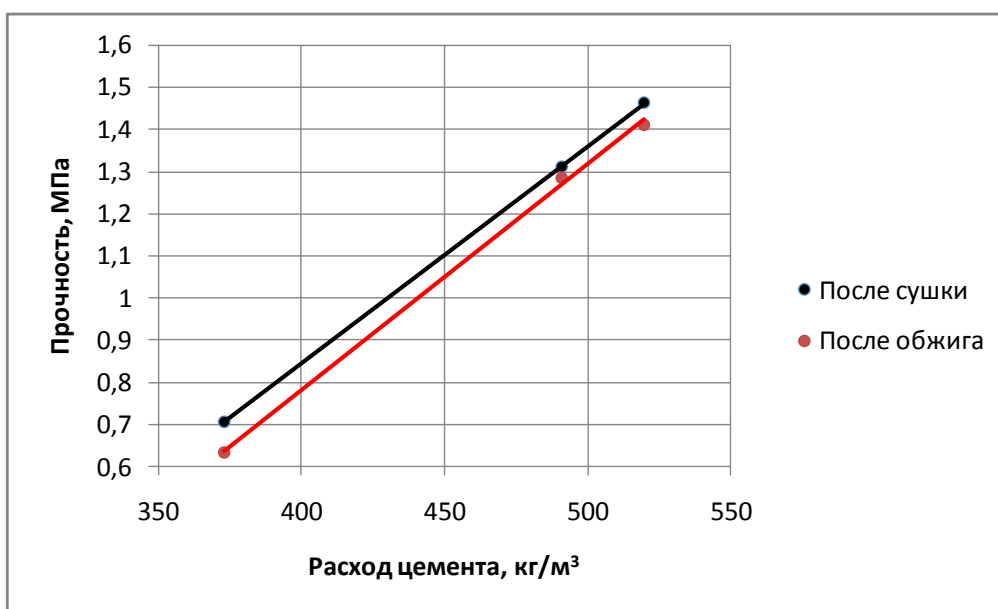


Рисунок 17 – Изменение прочности образцов вермикулитобетона с добавкой NaOH после сушки до 200 °С и после обжига до 800 °С

На рисунке 18 представлен график зависимости прочности вермикулитобетона от его плотности.

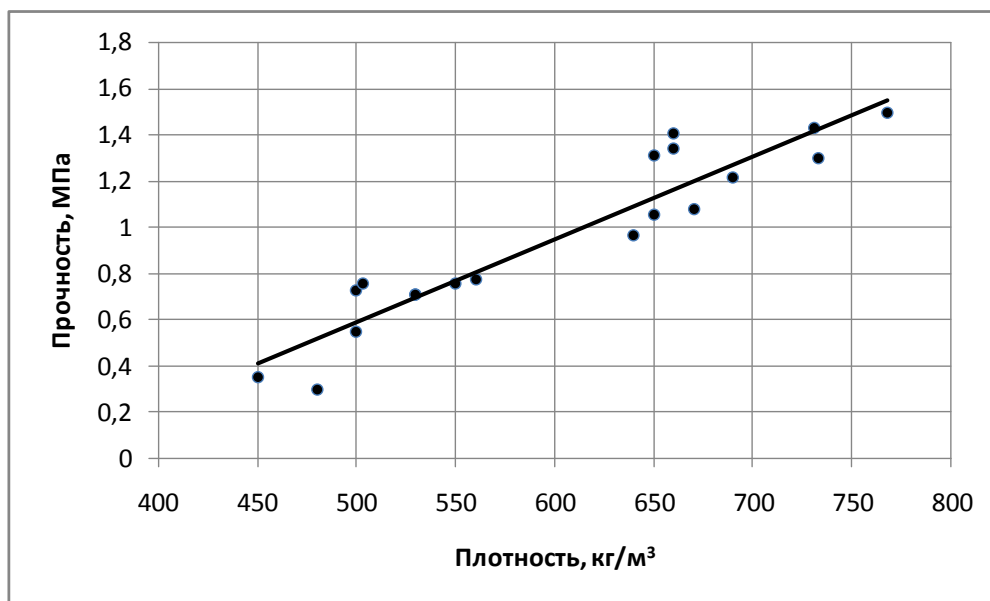


Рисунок 18 – Зависимость прочности вермикулитобетона от его плотности

Из графика, представленного на рисунке 18 видно, что между прочностью вермикулитобетона и его плотностью имеется линейная зависимость.

Графику функции представленному на рисунке 18 соответствует уравнение, представленное в формуле 3.

$$R_{сж} = k \cdot p + C_2, \quad (3)$$

где $R_{сж}$ – прочность вермикулитобетона на сжатие; k , C_2 – постоянные коэффициенты; p – плотность вермикулитобетона.

Решив систему уравнений выше представленного типа для двух различных составов определено значение коэффициента k для вермикулитобетона, который, в возрасте 3 суток, равен 0,00359. Коэффициент C_2 для выше представленной зависимости равен -1,209.

3.2 Выводы по исследовательской части

- добавка ферротитанового шлака в глиноземистый цемент снижет скорость его твердения и прочность цементного камня, но увеличивает его огнеупорность;
- оптимальное количество добавки ферротитанового шлака в глиноземистый цемент составляет 15 %;
- прочность и плотность вермикулитобетона увеличиваются с расходом цемента;
- прочность и плотность вермикулитобетона с водOVERвермикулитовым отношением 3,9-4,1 выше данных показателей, чем у образцов с меньшим водOVERвермикулитовым отношением при одинаковом расходе цемента, что объясняется лучшей удобоукладываемостью смеси и, как следствие, образованию более плотной структуры образцов при их изготовлении методом вибролитья;
- добавка едкого натра в количестве 0,8 % от массы цемента увеличивает прочность вермикулитобетона к 3 суткам приблизительно на 30-40 %, не снижая его прочностных показателей при воздействии рабочих температур.

Таблица 10 – Оптимальные разработанные составы вермикулитобетона

Наименование	№ состава			
	1	2	3	4
ГЦ ¹ , кг	373	391	489	520
В/Ц	1,54	1,36	1,10	1,05
В/В	4,00	3,54	3,79	3,59
NaOH ² , %	0,8	0,8	-	0,8

¹ – расход на м³ бетонной смеси;

² – от массы цемента.

Наиболее оптимальные разработанные составы вермикулитобетона представлены в таблице 10. Основные их физико-механические показатели представлены в таблице 11.

Таблица 11 – Физико - механические показатели оптимальных разработанных составов вермикулитобетона

Наименование	№ состава			
	1	2	3	4
Плотность после сушки до 200 °С, кг/м ³	530	560	640	660
Плотность после обжига до 800 °С, кг/м ³	510	530	600	620
Прочность после сушки до 200 °С, МПа	0,71	0,77	0,96	1,34
Прочность после обжига до 800 °С, МПа	0,60	0,64	0,72	1,10
Прочность после обжига до 1100 °С, МПа	0,64	0,66	0,74	1,16
Деформация усадки после обжига до 800 °С, %	0,4	0,5	0,3	0,5
Термостойкость, воздушных теплосмен	4	5	7	8

4 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Приблизительная схема производства малогабаритных изделий из



вермикулитобетона методом вибролитья представлена на рисунке 19.

Рисунок 19 – Схема производства малогабаритных теплоизоляционных изделий из вермикулитобетона

Схема производства включает в себя холодный склад сырья (1). На данном складе хранятся материалы с расчетом на обеспечение 1 месяца

производства с целью недопущения его срыва при сбоях в поставках. Поставка сырья на склад осуществляется автотранспортом. Поставка сырья с холодного склада (1) в теплый промежуточный склад цеха (2) по производству изделий осуществляется погрузчиком. На промежуточном теплом складе цеха (2) осуществляется хранение сырья с расчетом на обеспечение производства в течение 3 суток. Теплый промежуточный склад сырья (2) организован с целью недопущения срыва производства при поломке погрузчика, а также, с целью выдержки сырья при положительных температурах окружающей среды в холодное время года. С промежуточного теплого склада сырья (2) при помощи кран-балки осуществляется загрузка цементного бункера емкостью 5 т с дозатором (3) и вермикулитового бункера емкостью 3 т с дозатором (4). В цеху имеется помещение для приготовления раствора едкого натра (5). В помещенье имеется приточно-вытяжная вентиляция с локальным отсосом воздуха над рабочей зоной. Помещение оборудовано краном подачи воды, настольными электрическими весами, электромиксером для перемешивания раствора. Приготовление раствора производится в емкостях 15 литров. Имеются мерники воды. В помещении имеется электропроводка с напряжением 220 вольт. Освещение искусственное. Доставка сухого едкого натра до помещения и раствора до бетоносмесителя осуществляется ручным способом. Приготовление бетонной смеси производится в лопастном смесителе (6). Смеситель оснащен баком для воды с мерительной шкалой. К баку подходит подача воды. Сырье подается в смеситель из бункеров с дозаторами (3,4) с помощью шнековых питателей. Приготовление бетонной смеси осуществляется по следующей последовательности:

- подача цемента в смесительную емкость в количестве 100 %;
- сухое перемешивание в течение 1-2 минут с целью измельчения комков;
- затворение водой в количестве 100 %;

- перемешивание в течение 1-2 минут;
- подача вермикулита в смесительную емкость в количестве 100 %;
- перемешивание в течение 5-7 минут;
- подача готовой смеси в формы.

Выгрузка готовой бетонной смеси осуществляется в мульту, которая при помощи рельсовой тележки транспортируется к вибростолу (7). Укладка бетонной смеси в формы осуществляется ручным методом. После укладки бетонной смеси в формы на вибростоле они транспортируются на участок хранения, выдержки форм и распалубки изделий (8). Распалубку изделий производят по истечении 1 суток после укладки. Затем изделия выдерживают 2 суток в условиях окружающей среды, после чего их перемещают в сушильную камеру (9,10) через участок упаковки продукции (10) с помощью рельсовых тележек. Сушка изделий производится в течение 2 суток (1 сутки – 90 °С, 2 сутки – 200 °С). С целью исключения простоев производства цех оборудован двумя сушильными камерами. Когда одна камера производит термообработку изделий при температуре 90 °С, другая – при 200 °С и наоборот. После окончания сушки, изделия с помощью рельсовых тележек транспортируют на участок упаковки продукции (10). На данном участке производится укладка готовой продукции на поддоны, их упаковка и транспортирование с помощью кран балки на промежуточный склад готовой продукции (11). С промежуточного склада готовой продукции изделия с помощью погрузчика перевозят на холодный склад готовой продукции (12) с которого осуществляется отгрузка изделий потребителю.

5 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

В работе проведены исследования вермикулитобетона на основе ГЦ -35 40 с добавкой ферротитанового шлака в количестве 15 %. Данное решение позволяет снизить расход цемента на производство продукции незначительно снизив прочностные показатели. Причем, добавка едкого натра в вермикулитобетон в количестве 0,8 % от массы цемента позволяет увеличить прочность теплоизоляционных изделий на основе рассматриваемого цемента на 30%, что нивелирует негативное влияние добавки ферротитанового шлака.

Сравнение затрат на производство м³ продукции на обычном ГЦ -35 40 и продукции, произведенной с применением результатов данного исследования приведены в таблице 12.

Таблица 12 – Стоимость продукции вермикулитобетона в зависимости от добавки в ГЦ ферротитанового шлака

Материал	Стоимость, руб/кг	Состав 1, кг/м ³	Состав 2, кг/м ³	Состав 3, кг/м ³
ГЦ -35 40	25	500	425	425
ФТ шлак	5	-	75	75
Вермикулит	40	145	145	145
NaOH	23	-	-	4
Стоимость руб/м ³		18300	16800	16889

Исходя из данных, представленных в таблице 12, добавка ферротитанового шлака в количестве 15 % в ГЦ позволяет снизить стоимость кубического метра произведенной продукции из вермикулитобетона на 1500 рублей. Причем, введение едкого натра в вермикулитобетон на основе ГЦ-35 40 с добавкой ферротитанового шлака в количестве 0,8 % от массы цемента

увеличит стоимость продукции на 89 руб/м³, при этом значительно увеличив ее прочностные показатели без снижения максимально допустимой температуры применения изделий.

6 БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

6.1 Классификация опасных и вредных производственных факторов

В соответствии с ГОСТ 12.0.003-2015 [34] производственные факторы по сфере происхождения делятся на две основные группы: факторы производственной среды и факторы трудового процесса.

По возможности нанесения вреда на организм человека производственные факторы делят на неблагоприятные и факторы, не являющиеся неблагоприятными.

Неблагоприятные производственные факторы могут быть вредными (приводящими к заболеваниям) и опасными (приводящими к травмам).

Вредные производственные факторы могут приводить к хроническим, либо острым заболеваниям. Опасные производственные факторы могут приводить к смертельным, либо не смертельным травмам.

Опасные и вредные производственные факторы могут быть постоянно действующими, переменно действующими (в том числе периодически) и импульсными (в том числе регулярные и случайные).

Неблагоприятные производственные факторы могут быть пространственно распределенными, взвешенными или растворенными в воздухе или жидкости, образующими локально ограниченные твердые объекты, либо содержащимися в них.

Опасные и вредные производственные факторы могут непосредственно действовать на организм человека, либо опосредственно.

Неблагоприятные производственные факторы по происхождению могут являться природными, технико-технологическими или эргономическими, также, они могут быть обнаруживаемыми органолептическими методами, либо нет.

Опасные и вредные производственные факторы по характеру своего происхождения делятся на порождаемые физическими свойствами, порождаемые химическими, либо физико-химическими свойствами, порождаемые биологическими свойствами, порождаемые поведенческими факторами и защитными реакциями живых существ, порождаемые социально-экономическими и организационно-управленческими условиями трудовой деятельности, порождаемые психическими и физиологическими свойствами и особенностями человеческого организма.

Факторы, порождаемые физическими свойствами могут быть связаны с силами и энергией механического движения, с слишком высокой, либо низкой температурой поверхности материальных объектов, с резким изменением барометрического давления воздуха рабочей зоны, с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды рабочей зоны, с загрязненностью воздушной среды рабочей зоны, с механическими колебаниями твердых тел или поверхностей, с акустическими колебаниями в рабочей зоне, с электрическим током, электромагнитными полями, световой средой, с неионизирующими и ионизирующими излучениями.

К опасным и вредным производственным факторам, порождаемым химическими свойствами, относятся физические объекты, которые при взаимодействии с организмом человека приводят к повреждению целостности тканей, либо к нарушению нормального функционирования организма. Вредные химические факторы могут проникать в организм человека через органы дыхания, желудочно-кишечный тракт, кожный покров, через открытые раны или проникающие ранения и при различного рода инъекциях. По воздействию на организм человека химические факторы могут быть токсичными, раздражающими, канцерогенными, мутагенными и влияющими на репродуктивную функцию человека.

Опасные и вредные производственные факторы, порождаемые биологическими свойствами, могут быть патогенным или условно

патогенными микроорганизмами, либо продуктами жизнедеятельности этих организмов. Результирующим действием на организм человека биологических факторов являются острые заболевания приводящие к летальному исходу, либо инвалидности, иные острые и хронические заболевания связанные, либо несвязанные с условиями труда. Вредные и опасные биологические производственные факторы могут попадать в организм человека через воздух, с пищей, либо водой, с укусами животных, либо насекомых, через кожный покров и слизистые оболочки, а также при инъекционном или другом насильственном проникновении.

К психофизиологическим вредным и опасным производственным факторам относятся физические, либо нервно-психические перегрузки. Физические нагрузки делят на статистические, связанные с рабочей позой, динамические, связанные с массой перемещаемого груза, либо с повторением стереотипных движений. Нервно-психические перегрузки могут быть связаны с умственным перенапряжением, перенапряжением анализаторов, монотонностью труда и эмоциональными перегрузками.

6.2 Опасные и вредные производственные факторы, связанные с производством вермикулитобетона и изделий на его основе

В работе проводятся исследования жаростойких теплоизоляционных бетонов, для приготовления которых применяются такие вещества как глиноземистый цемент, шамотный наполнитель, вермикулит, едкий натр, алюминиевая пудра и карбид кремния.

При производстве вермикулитобетона и изделий на его основе возникают опасные и вредные производственные факторы, порождаемые физическим и химическим воздействием на организм человека. Также, возникают факторы, обладающие свойствами психофизического воздействия на организм.

К опасным и вредным производственным факторам обладающим свойствами физического воздействия на организм человека относятся:

- действие силы тяжести, которое может вызвать падение твердых и сыпучих тел на работника (перемещение грузов с помощью кран-балки);
- действие силы тяжести, которое может вызвать падение рабочего на опорную поверхность;
- действие силы тяжести, которое может вызвать падение рабочего с высоты (при загрузке, чистке бункеров);
- неподвижные режущие, колющие, обдирающие, разрывающие части твердых объектов, воздействующие на работника при соприкосновении (выступающие части бетоносмесителей, вибростолов и т.п.);
- твердые поверхности, о которые ударяются движущиеся части тела работника (выступающие части бетоносмесителей, вибростолов и т.п.);
- движущиеся твердые объекты, наносящие удар по телу рабочего (перемещение грузов, форм со смесью и т.п.);
- факторы, связанные с высокой температурой поверхности твердых тел (сушка готовых изделий в сушильной камере);
- факторы, связанные с чрезмерным загрязнением воздуха рабочей зоны (цементная, вермикулитовая пыль);
- повышенный уровень локальной вибрации (виброуплотнение смеси в формах);
- факторы, связанные с повышенным уровнем шума рабочей зоны (шум от работы оборудования);
- факторы, связанные с воздействием электрического тока (оборудование, работающие под напряжением);
- отсутствие естественного освещения.

Химические вещества при производстве вермикулитобетона находятся в твердом, жидком и порошкообразном состоянии. Данные вещества могут попадать в организм человека через органы дыхания, желудочно-кишечный тракт (цементная и вермикулитовая пыль) и через кожный покров (раствор гидроксида натрия). По характеру воздействия на организм данные вещества являются раздражающими. Указанные химические вещества действуют непосредственно на организм человека как опасные и вредные производственные факторы.

Предельно допустимые концентрации в воздухе рабочей зоны вредных веществ представлены в таблице 13.

Таблица 13 – ПДК вредных химических веществ

Материал	ПДК в воздухе ¹ , мг/м ³	Агрегативное состояние	Класс опасности ²	Особенности воздействия на организм ³
Вермикулит	0,5/1	аэрозоль	3	Ф
Цементная пыль	-/8	аэрозоль	3	Ф
Едкий натр (NaOH)	0,5	аэрозоль	2	-

¹ – в числителе указывается максимальная разовая ПДК, в знаменателе – среднесменная ПДК. В случае наличия одного значения в столбце указывается максимальная разовая ПДК;

² – 2 – высоко опасные, 3 – умерено опасные;

³ – Ф – аэрозоли, преимущественно фиброгенного действия.

При производстве вермикулитобетона и изделий на его основе также возникают психофизиологические вредные и производственные факторы. У рабочего персонала возникают физические перегрузки, связанные с тяжестью

перемещаемого вручную груза, рабочей позой и наклонами тела работника. У инженерно-технического персонала возникают умственные и эмоциональные нервно-психические перегрузки, связанные с активным наблюдением за ходом производственного процесса и числом производственных объектов одновременного наблюдения.

В соответствии с разделом по технике безопасности к пособию СНиП 3.09.01-85, работники, занимающиеся приготовлением бетонных смесей должны работать в защитных очках, респираторах и плотных комбинезонах. Лица, занимающиеся приготовлением раствора едкого натра и суспензии алюминиевой пудры должны находиться в резиновых перчатках и защитных очках. Месторасположение смесителей должно быть оборудовано приточно-вытяжной вентиляцией с устройством локальных отсосов пыли в наиболее запыленных участках.

Включение и выключение оборудования, работающего под напряжением должно производиться в резиновых сапогах и перчатках. Работы по виброуплотнению смеси производятся в специальных антивибрационных рукавицах. При подъеме грузов краном необходимо проверять надежность их крепления к крюку крана.

Работники предприятия должны знать действующие, относящиеся к их трудовой деятельности, инструкции по охране труда и уметь оказывать первую необходимую медицинскую помощь.

7 ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

- на глиноземистом цементе, модифицированном добавками глиноземистого титанового шлака, разработан жаростойкий вермикулитобетон со средней плотностью $500 - 600 \text{ кг/м}^3$, прочностью $0,9 - 1,1 \text{ МПа}$, и термостойкостью 6 теплосмен;
- исследованы основные жаростойкие свойства вермикулитобетона, установлено, что температура применения составляет не менее $1100 \text{ }^\circ\text{C}$, а при использовании модифицированного цемента – не менее $1150 \text{ }^\circ\text{C}$;
- определено, что основные свойства бетона зависят от водо-вермикулитового соотношения, определяющего удобоукладываемость смеси, плотность и прочность жаростойкого бетона;
- установлено, что прочность вермикулитобетона определяется водо-вермикулитовым соотношением и плотностью материала, определены зависимости, описывающие связь линейными уравнениями;
- определены оптимальные составы жаростойкого вермикулитобетона, позволяющие получить материал с требуемой плотностью в диапазоне $450-700 \text{ кг/м}^3$, прочностью $0,4 - 1,4 \text{ МПа}$, термостойкостью 4 – 8 циклов;
- на основе анализа полученных закономерностей установлено, что вне зависимости от способа укладки прочность бетона определяется его плотностью, причем связь носит линейный характер;
- исследована термическая стойкость вермикулитобетона, установлена ее связь с плотностью материала;
- определены основные технико-экономические показатели вермикулитобетона, установлено, что введение в глиноземистый цемент добавки шлака позволяет снизить стоимость на 1500 руб/м^3 бетона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Жаростойкие теплоизоляционные бетоны эффективно используются в промышленности. Одним из таких видов бетонов является вермикулитобетон. На его основе изготавливают множество жаростойких обмазок и растворов, торкрет-бетонов и легковесных изделий. Проводится множество исследований по подбору оптимального состава заполнителей данного вида бетона, изучению влияния различных добавок на физико-механические свойства вермикулитобетона, армированию растворов на его основе. В связи с высокой стоимостью глиноземистого цемента, чаще всего в качестве вяжущего для приготовления бетонов на основе вермикулита используют портландцемент, что ограничивает возможности применения данного бетона и приводит к непродолжительному сроку службы в условиях высоких температур.

В рамках данной работы проведены исследования вермикулитобетона на основе глиноземистого цемента с добавкой ферротитанового шлака. Выявлено, что оптимальное количество данной добавки составляет 15 % от массы цемента. Предложенное количество добавки ферротитанового шлака позволяет значительно снизить себестоимость продукции из вермикулитобетона, без заметного уменьшения эксплуатационных показателей изделий. Также, выявлено, что добавка едкого натра в вермикулитобетон в количестве 0,8 % от массы цемента позволяет без существенного увеличения себестоимости значительно повысить прочностные показатели вермикулитобетонной продукции без снижения эксплуатационных температур ее применения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 969-91. Цементы глиноземистые и высокоглиноземистые. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2007. – 7 с.
2. Кузнецова, Т.В. Глиноземистый цемент / Т.В. Кузнецова, И. Талабер – Москва: Стройиздат, 1988. – 265 с.
3. ГОСТ 10178 – 85. Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2008. – 10 с.
4. Некрасов, К. Д. Жароупорный бетон на портландцементе / К.Д. Некрасов, А.П. Тарасова М.: Изд-во литературы по строительству, 1969. – 192 с.
5. Тимохин, А.Л. Влияние соотношения заполнителей на свойства жаропрочного керамзито-вермикулитового бетона / А.Л. Тимохин, М.Х. Хусниярова, В.А. Магилата // Вестник государственного нефтяного технического университета. УДК 66.041.
6. Губбер, Э.В. Использование вермикулитовой породы в производстве строительных материалов / Э.В. Губбер, А.В. Петров // Известия томского ордена трудового красного знамени политехнического института имени С.М. Кирова. – 1971. – Т. 174.
7. Хежев, Т.А. Технология армоцементных конструкций высокой огнестойкости с теплозащитным слоем из эффективного легкого бетона: автореферат дис. д-ра тех. наук / Т.А. Хежев. – Ростов-на-Дону: Издательство Ростовского государственного университета, 2007. – 43 с.
8. Быстригина, С.В. Снижение усадочных деформаций жаростойкого вермикулитобетона / С.В. Бастрыгина, А.Д. Журбенко, Р.В. Конохов // Проблемы рационального использования природного и техногенного сырья Баренцева региона в технологии строительных и технических материалов:

сборник материалов второй Международной научной конференции 2005 – Петрозаводск: Изд-во Карельского научного центра РАН, 2005. – С. 17–19.

9. Макбузов, А.С. Вермикулит Каратас-Алтынтасского месторождения и его применение в производстве азрированных легких бетонов автореферат дис. кон. тех. наук / А.С. Макбузов – Санкт-Петербург: Издательство Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета, 2009. – 24 с.

10. Сосим, В.С. Исследование влияния вермикулита на подвижность растворной смеси и прочность огнезащитного раствора / В.С. Сосим // Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. УДК 691.53.

11. Ахтямов, Р.Я. Вермикулит – сырье для производства огнеупорных теплоизоляционных материалов / Р.Я. Ахтямов // Огнеупоры и техническая керамика. - 2009. - №1-2. – С. 58-64.

12. Зин, М.Х. Композиционные материалы на основе жидкостекольного связующего для теплоизоляции дис. кон. тех. наук / М.Х. Зин – Москва : Издательство Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева, 2020. – 146 с.

13. Некрасов, К.Д. Применение жаростойких бетонов в строительстве тепловых агрегатов / К.Д. Некрасов. – Москва: Изд-во Стройиздат, 1965. – 62 с.

14. Мельников, Ф.И. Жаростойкие бетоны на основе высокоглиноземистого цемента / Ф.И. Мельников // Жаростойкий бетон и железобетон в строительстве. – 1966. – С. 38-44.

15. Ахтямов, Р.Р. Жаростойкий бетон повышенной термостойкости на шлакощелочном вяжущем / Р.Р. Ахтямов // Огнеупоры и техническая керамика. – 2010. - №3. – С. 43-46.

16. Обжиг вермикулита / Я.А. Ахтямов, Б.С. Бобров, Г.В. Геммерлинг, М.Б. Эпельбаум. – М: Стройиздат, 1972. – 128 с.

17. Ахтямов, Р.Я. Потанинский вермикулит – перспективное сырье для производства высокотемпературных теплоизоляционных материалов / Р.Я. Ахтямов // Огнеупоры и техническая керамика. – 2011. - №4-5. – С. 92-96.

18. ГОСТ 12865-67 Вермикулит вспученный. – М.: Издательство стандартов, 1995. – 5 с.

19. Кузьменков, М.Н. Вяжущие вещества и технология производства изделий на их основе / М.Н. Кузьменков, Т.С. Куницкая – Минск: Изд-во Учебники, 2003. – 218 с.

20. Волонежский, А.В. Минеральные вяжущие вещества / А.В. Волонежский, Ю.С. Буров, В.С. Колокольников – М.: Изд-во Стройиздат, 1979. – 480 с.

21. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. – М.: Стандартиформ, 2018. – 49 с.

22. ГОСТ 20910-2019. Бетоны жаростойкие. Технические условия. – М.: Стандартиформ, 2019. – 49 с.

23. ГОСТ 12730.1-78 Бетоны. Методы определения плотности. – М.: Стандартиформ, 2018. – 12 с.

24. Ставер, П.К. Исследования вермикулита татарского месторождения и получение теплоизоляционных материалов на его основе / П.К. Ставер, Полетаев Г.А. // Вестник Сибирского федерального университета. УДК 691.2.

25. Горлов, Ю.П. Технология теплоизоляционных материалов / Ю.П. Горлов, А.П. Меркин, А.А. Устенко – М.: Изд-во Стройиздат, 1980. – 399 с.

26. Справочное пособие к СНиП 3.09.01-85 Технология изготовления жаростойких бетонов. – М.: Стройиздат, 1991. – 90 с.

27. Власов, А.В. Жаростойкие вяжущие и бетоны с применением высокоглиноземистого шламового отхода дис. кон. тех. наук / А.В. Власов – Самара: Издательство Самарского технического университета, 2019. – 203 с.

28. Тарасова, А.П. Жаростойкие вяжущие на жидком стекле и бетоны на их основе / А.П. Тарасова – М.: Изд-во Стройиздат, 1982. – 133 с.

29. ГОСТ 5494-95 Пудра алюминиевая. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2006. – 21 с.

30. Брыков, А.С. Ускорители схватывания и твердения в составе сухих бетонных смесей / А.С. Брыков // Бетоны и сухие смеси. - 2008. - Т. 6/Б(79), № 11. - С. 35-37.

31. Абызов, В.А. Ячеистые жаростойкие бетоны на фосфатном вяжущем и заполнителях из кремнеграфитовых и алюмохромсодержащих промышленных отходов / В.А. Абызов, Ч.Г. Пак, В.М. Батрашове // Огнеупоры и техническая керамика. – 2011. - №11-12. – С. 27-29.

32. ГОСТ 23037-99 Заполнители огнеупорные. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2008. – 13 с.

33. ГОСТ Р 55064-2012 Натр едкий технический. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2019. -71 с.

34. ГОСТ 12.0.003-2015 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. – М.: Стандартинформ, 2019. – 25 с.

35. Рывин, В.М. Титаноглиноземистый шлак – полифункциональное техногенное сырье высокоглиноземистого состава. Часть 1. Вещественный состав и свойства титаноглиноземистых шлаков / В.М. Рывин, В.А. Перепилицын, А.А. Пономаренко, С.И. Гильварг // Новые огнеупоры. – 2017. - №3. – С. 98-103.

36. Перепелицын, В.А. Материаловедение ферросплавных алюмотермических шлаков / В.А. Перепелицын, В.М. Рытвин, В.Г. Григорьев // Инновации в материаловедении и металлургии. – 2012. – Ч. 1. – С. 168-179.

37. ГОСТ 310.3-76 Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема (с Изменением № 1). – М.: Издательство стандартов, 2003. – 10 с.