

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ  
Южно-Уральский государственный университет  
Институт «Архитектурно-строительный»  
Кафедра «Строительные материалы и изделия»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

/А.А. Орлов/

«    »

2021 г.

**Пояснительная записка к выпускной квалификационной работе**  
**08.03.01.2021.227.00.00. ПЗ**  
**«Модифицированный глиноземистый цемент и жаростойкий газобетон**  
**на его основе»**

Руководитель ВКР

/В.А. Абызов/

«    »

2021г.

Автор ВКР

студентка группы АС – 269

/Р.М. Алседе/

«    »

2021г.

Нормоконтролёр

/Т.Н. Черных/

«    »

2021г.

Челябинск  
2021

## АННОТАЦИЯ

Алседе Р.М. Модифицированный глиноземистый цемент и жаростойкий газобетон на его основе – Челябинск: ЮУрГУ, СМиИ, 2021, 71с., 9 ил., 6 табл.

Библиографический список – 31 наименование.

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

Разработан жаростойкий теплоизоляционный газобетон на основе глиноземистого цемента с шамотным заполнителем. Определены его эксплуатационные показатели и зависимость физико-механических свойств от содержания едкого натра и количества воды затворения. Найдены наиболее оптимальные составы по соотношению плотность – прочность. Проведен расчет экономической целесообразности производства и применения полученного теплоизоляционного материала.

					<i>08.03.01.2021.148.00.00.ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Алседе Р.М</i>			Модифицированный глиноземистый цемент и жаростойкий газобетон на его основе	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Абызов В.А.</i>					<i>5</i>	<i>71</i>
<i>Нормоконтр.</i>		<i>Черных Т.Н.</i>				<i>ЮУрГУ (НИУ) СМиИ</i>		
<i>Зав кафедрой</i>		<i>Орлов А.А.</i>						

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР .....	6
1.1 Жаростойкие бетоны, их виды и направления развития .....	6
1.2 Общие сведения и развитие технологии .....	6
1.3 Основные виды и свойства .....	9
1.4 Влияние вида вяжущего на температуру применения.....	10
1.4.1 Портландцемент.....	10
1.4.2 Глиноземистый цемент .....	11
1.4.3 Жидкое стекло.....	12
1.4.4 Высокоглиноземистый цемент.....	12
1.4.5 Фосфатные связующие.....	13
2. ЛЕГКИЕ ЖАРОСТОЙКИЕ БЕТОНЫ .....	14
2.1 Виды и общие сведения.....	14
2.2 Технология легких жаростойкие бетонов .....	15
2.2.1 Легкие заполнители .....	15
2.2.2 Виды легких бетонов.....	17
2.2.3 Жаростойкий ячеистый бетон .....	21
2.2.4 Материалы для жаростойкого легкого бетона на глиноземистых цементах.....	25
3 ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ .....	31
4 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	32
4.1 Исходные материалы.....	32
4.1.1 Заполнители.....	32
4.1.2 Цемент.....	33
4.1.3 Едкий натр NaOH.....	35

4.1.4	Алюминиевая пудра .....	35
4.1.5	Материал для подготовки пудры алюминиевой.....	36
4.2	Требования к выполнению испытаний .....	36
4.3	Методы испытаний .....	37
5	ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЧАСТЬ .....	41
5.1	Модифицирование глиноземистого цемента.....	41
5.2	Текучесть газобетонной смеси .....	41
5.3	Подбор составов и определение основных характеристик газобетона....	42
5.4	Изучение процессов, происходящих при твердении газобетона методами дериватографии .....	51
5.5	Исследование жаростойких свойств газобетона .....	52
6	БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ.....	55
7	ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ.....	59
8	ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ.....	62
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	63
	БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	64

## **ВВЕДЕНИЕ**

В противоположность жаростойким бетонам, традиционные огнеупоры приобретают прочность в результате предварительного обжига огнеупора или в результате обжига в процессе эксплуатации. Понятия «жаростойкие бетоны» и «огнеупорные бетоны» весьма близки. Однако исторически сложилось относить к огнеупорным бетонам материалы, приобретающие прочность преимущественно в результате процессов спекания, обладающие более высокими температурами применения и не содержащие крупного заполнителя. Отсутствие крупного заполнителя обосновывается тем, что на границе заполнителя и цементного камня могут возникать достаточно большие температурные напряжения. В то же время, огнеупорные бетоны более склонны к «крипу» – ползучести при высоких температурах. Получившие широкое распространение так называемые «неформованные огнеупоры», в зависимости от состава, либо являются обычными жаростойкими бетонами, либо мелкозернистыми жаростойкими бетонами, либо огнеупорными бетонами. В данной работе не рассматриваются огнеупорные бетоны и керамобетоны, приобретающие прочность преимущественно благодаря формированию керамической связки.

Жаростойкие бетоны являются весьма эффективными материалами, выгодно отличаясь от традиционных штучных огнеупоров. Применение жаростойких бетонов взамен штучных огнеупоров упрощает, ускоряет и удешевляет процесс монтажа. Из бетона возможно изготовление изделий сложной конфигурации, а также крупногабаритных изделий. Производство подобных изделий по традиционным технологиям обжиговых огнеупоров требует огромных затрат, велика вероятность получения брака при сушке и обжиге.

Таким образом, в производстве сложных, крупногабаритных изделий, малых серий нестандартных и просто фасонных изделий жаростойкие бетоны незаменимы.

Во всем мире систематически начало увеличиваться производство жаростойких бетонов. С начала 1960-х годов применение легких бетонов систематически растет.

В производстве легких бетонов основным направлением является снижение стоимости материалов, повышение температуры применения, применение вторичного сырья на производстве и повышение качества продукции.

Большое количество зарубежной и отечественной литературы посвящено жаростойкому бетону на различных заполнителях и вяжущих.

Заполнитель в отличие от вяжущего обладает более высокими огнеупорными свойствами. Применение вяжущего зависит от множества факторов: стойкостью к агрессивной среде, физико-механическими показателями, температурой эксплуатации.

# 1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

## 1.1 Жаростойкие бетоны, их виды и направления развития

Различают жаростойкие и огнеупорные бетоны. Определение огнеупорного бетона будет варьироваться в зависимости от конкретного автора. Тем не менее, общее определение: «бетон, пригодный для использования при высоких температурах, состоящий из гидравлического цемента в качестве связующего и огнеупорного заполнителя и / или наполнителя. Граница между жаропрочным и огнеупорным бетоном несколько условна. Некоторые определения огнеупорного бетона начинаются с 1500 °С [6].

К жаростойким относят бетоны с температурой применения до 1800 °С – в соответствии с требованиями ГОСТ 20910 [12]. В отличие от традиционных (обжиговых) огнеупорных материалов, они приобретают прочность благодаря твердению вяжущего при нормальных или невысоких (тепловлажностная обработка или сушка) температурах. Кроме этого, еще одним отличительным признаком для жаростойких бетонов выступает наличие заполнителя, создающего «жесткий каркас». Его наличие приводит к повышению огнеупорности [12][21].

## 1.2 Общие сведения и развитие технологии

В современном мире немалую роль играет жаростойкий бетон. Появление жаростойкого бетона и его внедрение в строительную индустрию значительно сказалось на различных отраслях промышленности. Выбор выпускаемой продукции из газобетона значительно велик он начинается от мелких изделий и заканчивается панелями и блоками. Это позволило ускорить возведение футеровок тепловых агрегатов, снизить энергоемкость производства материалов (штучные огнеупоры, как правило, требуют обжига). Изначально изучалась возможность применения «обычного» тяжелого бетона при воздействии повышенных температур [9].

Обычный тяжелый бетон при высоких температурах. Он широко применяется при производстве и строительстве различных зданий и сооружений.

Зачастую подвергается воздействию высоких температур, за счет пожаров, температура в железобетонных конструкциях может достигать 700-1000 °С. Ученые всегда проявляли огромный интерес к тяжелому бетону при нагревании его. Исследовали, какие физические и химические процессы протекают в бетоне с повышением температуры. Эти испытания позволяют понять нам насколько надежен и долговечен будет бетон при различных температурных воздействиях. Были разработаны мероприятия по защите бетона от разрушений от нагрева. Первое мероприятие по защите бетона – это подбор состава бетона и применение в него специальных огнеупорных добавок, заполнителей и вяжущих. Ко второму можно отнести армирование поверхностного слоя конструкции [10].

В основе разработок такого бетона были работы Некрасова К.Д. [10]. Позднее развитие этого научного направления вели его коллеги и ученики [10]. Основное применение жаростойких бетонов – это использование их как футеровочного материала в тепловых агрегатах и иных конструкциях, где присутствует высокая температура. Основные свойства, которые регламентируют для этих бетонов: прочность при сжатии, изгибе и растяжении, усадка, температура применения, термическая стойкость (термостойкость), остаточная прочность, дополнительно может нормироваться стойкость к агрессивным средам и истираемость [10].

Разделяют обжиговые огнеупоры (штучные и неформованные) и жаростойкие бетоны по ГОСТ 20910 [1]. Огнеупорные материалы можно разделить на виды, в зависимости от их химических составов. Так, существуют кислые, содержащие оксиды кремния и алюминия, нейтральные содержащих, основные, в состав которых входят, главным образом, оксиды магния и кальция. Основными показателями огнеупорных изделий служит температура применения и средняя плотность. Тяжелые (плотные) огнеупоры и бетоны имеют плотность в пределах 2000-4500 кг/м<sup>3</sup>. Ультралегковесные изделия и бетоны имеют плотность 400-1500 кг/м<sup>3</sup>. Так как штучные огнеупорные материалы требуют обжига, более широкое применение с конца XX в. получили жаростойкие бетоны [10]



Тяжелые, особо тяжелые жаростойкие бетоны предназначенные для изготовления конструкций и тепловых агрегатов, эксплуатационные условия которых требуют стойкости при высоких температурах. К ним предъявляют также повышенные требования по иным показателям – прочности, плотности, иногда газопроницаемости. Жаростойкий бетон обычно имеет высокий коэффициент теплопроводности, поэтому не целесообразно применение его как футеровочного материала без дополнительной теплоизоляции. Широкое применение для тепловых агрегатов нашли плотные жаростойкие бетоны – с плотностью 1800-2200 кг/м<sup>3</sup>. Они имеют коэффициент теплопроводности не выше, чем в широко распространенных огнеупоров алюмосиликатного состава (полукислых, шамотных) и при этом обладают достаточной прочностью [10].

Виды вяжущих для жаростойких бетонов:

- шлакопортландцемент
- портландцемент быстротвердеющий
- портландцемент с тонкомолотыми добавками, в основном кремнеземистого, алюмосиликатного и алюминатного составов
- жидкое стекло с различными отвердителями
- глиноземистый и высокоглиноземистый цемент
- фосфатное связующее

Исходя из химического состава вяжущего, следует подобрать нужный наполнитель – с нужной температурой применения и реакционной способностью. Наиболее стабильными свойствами обладает шамотные и полукислые, алюмосиликатные огнеупоры, высокоглиноземистые, каолиновые, корундовые [9]. Они наиболее распространены среди огнеупорных наполнителей. Огнеупорность материала зависит от минералогии и химсостава, для алюмосиликатных и глиноземистых – от количества оксида алюминия. Содержание его в наполнителе – от 15 до 90%, огнеупорность соответственно от 1580 °С и до 1900-2000 °С у наиболее чистых. Наиболее доступным по стоимости алюмосиликатным наполнителем являются шамотные и полукислые ( содержат 15-45% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Кусковой шамот получается после обжига огнеупорной глины.

Допускается также применение лома бетонных изделий, в котором в качестве заполнителя был применен шамот [9].

Жаростойкие бетоны на основе алюмосиликатных заполнителей имеют среднюю плотность 1900-2000 кг/м<sup>3</sup>. Чем больше содержание в бетоне Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, тем больше средняя плотность бетона.

Гранулометрический состав шамота аналогичен заполнителю для тяжёлого бетона. Его подразделяют на песок с фракцией 0-5 мм и щебень с фракций 5-10, 10-20 или 5-20 мм. Возможно применение заполнителя с крупностью до 40 мм [10]. Предельно допустимая температура жаростойкого бетона может достигать до 1800 °С [1].

Температура применения бетона зависит от его огнеупорности и температуры деформации под нагрузкой. При высоких температурах образование жидкой фазы, в первую очередь, будет зависеть от тонкодисперсных частиц и взаимодействующих компонентов вяжущего и тонкомолотого заполнителя. Расплав при нагревании образовывается по следующей схеме:

- 1) За счет взаимодействия тонкомолотого дисперсного заполнителя и цемента;
- 2) За счет взаимодействия цементного камня с поверхностью зерен заполнителя [9].

### **1.3 Основные виды и свойства**

Кроме вида вяжущего, жаростойкие бетоны разделяют по

– по виду тонкомолотой добавки – с шамотной, аглопоритовой, муллитокорундовой, магнезиальной, корундовой, кордиеритовой, хромитовой, золашлаковой, керамзитовой, периклазовой, из ферросплавных шлаков, из боя керамического кирпича (цемянка);

– по виду заполнителя - с шамотным, муллитокорундовым, корундовым, магнезиальным, карборундовым, кордиеритовым, кордиеритомуллитовым, муллитокордиеритовым, шлаковым, золашлаковым, базальтовым, диабазовым, андезитовым, диоритовым, керамзитовым, аглопоритовым, перлитовым, вермикулитовым, из боя бетона.

Помимо вида вяжущего, бетоны разделяют по виду заполнителя и по плотности. В жаростойких бетонах средняя плотность в основном зависит от плотности заполнителя. Выделяют следующие виды бетонов:

- по назначению – на конструкционные, теплоизоляционные;
- по структуре – на плотные, тяжелые и легкие, ячеистые;

Выделяют три группы легких жаростойких бетонов, в зависимости от их прочности и плотности:

- первый тип – теплоизоляционные бетоны;
- второй – конструкционно-теплоизоляционные;
- третий тип – конструкционные лёгкие бетоны.

Бетоны, применяемые для теплоизоляции должны иметь значение по средней плотности менее 1000 кг/м<sup>3</sup>, а для несущих конструкций значение должно быть 1000 кг/м<sup>3</sup> и больше этого [9].

Легкие жаростойкие бетоны (и газобетон) состоят из следующих групп:

- Облегченный легкий бетон и газобетон с средней плотностью более 1800 кг/м<sup>3</sup>.
- Легкие газобетон со значением средней плотности более 500 и до 1800 кг/м<sup>3</sup>.
- Особо легкие с средней плотностью до 500 кг/м<sup>3</sup> [9].

Жаростойкие бетоны разделяют на классы по предельной температуре их применения (от И3 до И18, от 300 °С до 1800 °С). В первую очередь, температура применения зависит от добавки и заполнителя также от химического состава вяжущего [11].

В следующем разделе подробнее рассмотрим влияние вида вяжущего на максимальную температуру применения жаростойкого бетона.

## **1.4 Влияние вида вяжущего на температуру применения**

### **1.4.1 Портландцемент**

В портландцементном клинкере дегидратация протекает при температуре до 1000 °С, что сопровождается снижением прочности [9]. Предельная

температура по СНиП равна 1100 °С. Его применение ограничено огнеупорностью силикатов кальция, которые образуются при распаде гидросиликатов.

За счет быстротвердеющего портландцемента с различными видами заполнителя можно получить жаростойкие бетоны с 3 класса по 11, соответственно с предельно допустимой температурой применения от 300 до 1100 °С. Заменяв ПЩ жидким стеклом, можно получить бетон с температурой применения до 1200-1300 °С. Жидкое стекло способно проникать в поры заполнителя и образовывать там более термостойкие, чем кварц, силикаты натрия [11]. Из требований СНиП предельная температура применения равна 1000 °С.

#### **1.4.2 Глиноземистый цемент**

Глиноземистые цементы (в англоязычной литературе – calcium alumina-cement, САС). Это цементы на основе моноалюмината кальция  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ . Хотя они не были разработаны специально для использования при высоких температурах, термостойкие и огнеупорные свойства САС быстро стали очевидны [18]. Глиноземистый цемент отличается большой жаростойкостью, если применяется огнеупорные заполнители. Условия применения – до температуры 1400 °С. В случае, где бывают высокие температуры то применяют высокоглиноземистый цемент в связке с высокоогнеупорными заполнителями. В таком цементе глинозем содержится в количестве 75-78%, с 3% кремнезема и с 1% оксида железа [18].

Если в бетоне на основе глиноземистого цемента содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в заполнителях около 30-50% то повышается температура деформации бетона под нагрузкой. При использовании шамота с 30%-ным содержанием алюминия оксида  $\text{Al}_2\text{O}_3$  температура размягчения его будет составлять 1200 °С. При замене шамота на высокоглиноземистый заполнитель с содержанием алюминия примерно 62% то температура 4%-ной деформации повысится до 1350 °С а разрушение происходит при 1450 °С [11].

Большим резервом для жаростойких бетонов служат огнеупорные кусковые отходы различных производств (ферросплавные, топливные и до-

менные шлаки) которые используются как исходные материалы. Применять доменные шлаки в жаростойкий бетон начали еще в 1950 году [11].

### **1.4.3 Жидкое стекло**

Бетоны на жидком стекле имеют снижение прочности после нагрева значительно меньше, чем у бетона на глиноземистом цементе. Достоинствам бетона на жидком стекле относится водостойкость, щелочностойкость, однако к минусам относится нестойкость к воздействию серной кислоты [9].

Прочность на сжатие обычно составляет 10-40 МПа, если в зависимости от того, какие использовали заполнители и тонкомолотые добавки. Обязательно вводится тонкомолотая добавка – отвердитель (на основе фторидов или силикатов) [9].

Дегидратация в жаростойком бетона на жидком стекле проходит при температуре 50-100 °С. При такой температуре не создается паров высокого давления и гидратация периклаза не наблюдается.

Этот бетон обладает хорошими термическими свойствами, также обладает способностью сопротивляться воздействию агрессивных сред. Основные достоинства этого бетона – это жаростойкость, химическая стойкость и термостойкость. Термостойкость бетона лучше всего на жидком стекле и заполнителями из шамота [9].

Температура применение плотных изделий на жидком стекле достигает 1400 °С.

### **1.4.4 Высокоглиноземистый цемент**

Бетоны на высокоглиноземистом цементе с высокоогнеупорными заполнителями могут выдерживать температуру до 1700 °С. Такие бетоны обладают незначительной усадкой и малыми коэффициентами термического расширения. Высокоглиноземистое вяжущие с огнеупорностью выше 1800 °С позволяет получить жаростойкий бетон с температурой применения 1800 и больше. Температура деформации под нагрузкой зависит от химического состава заполнителя. При наличии в заполнители  $Al_2O_3$  больше 80% это приво-

дит к увеличению температуры деформации под нагрузкой, соответственно, к увеличению предельно допустимой температуры применения [11].

#### **1.4.5 Фосфатные связующие**

Вяжущими в жаростойких бетонах на фосфатных связующих является ортофосфорная кислота и фосфаты некоторых металлов с различной степенью замещения.

Важнейшие виды фосфатов: алюмофосфатные, магнийфосфатные, алюмосиликофосфатные, алюмохромфосфатные, цирконийфосфатные. Применяют также смешанные (на основе фосфатов двух, трех металлов).

Изделия на фосфатной связующем твердеют при температуре 300-500 °С и повышают свою прочность в результате термической обработки. Температура применения этого бетона 1500-1700 °С, показатель может меняться в зависимости от свойств и состава применяемых заполнителей и вида примененного связующего, вида добавок [9].

## 2. ЛЕГКИЕ ЖАРСТОЙКИЕ БЕТОНЫ

### 2.1 Виды и общие сведения

Для теплоизоляционных бетонов основным критерием служит теплоизоляция и правильно выбранные условия применения, такие бетоны применяются в однослойных конструкциях. Лёгкие бетоны имеют меньшую плотность и меньшую теплопроводность относительно тяжёлых бетонов. Применение жаростойких бетонов позволяет уменьшить массу толщину и материалоемкость конструкций. Жаростойкие бетоны нашли принципиальные решения в области конструирования тепловых агрегатов. К.Д. Некрасов и его ученики разработали несколько видов жаростойких бетонов на пористых заполнителях с прочностью при сжатии от 1 до 25 МПа 500-1800 кг/м<sup>3</sup> [9].

Жаростойкие бетоны марок М150, М200, М250 с средней плотностью 1300-1600 кг/м<sup>3</sup> способны заменить тяжёлые бетоны в однослойных конструкциях [12].

Легкий жаростойкий бетон отличается простотой в изготовлении по сравнению с легковесными огнеупорными изделиями. Производство лёгкого жаростойкого бетона настолько простое, что его можно производить в полигонных условиях, за счёт этого можно повысить индустриализацию тепломонтажных работ за счет крупных блоков и панелей. Из-за больших размеров изделий (блоков) можно повысить производительность труда в 2-3 раза [12].

Легкие бетоны имеют прочность на сжатие от 1,0-1,5 МПа и значение средней плотности в районе от 500 кг/м<sup>3</sup> до 1000 кг/м<sup>3</sup>. Конструкционные лёгкие бетоны имеют значение 1000-1800 кг/м<sup>3</sup> и прочность на сжатие 10-25 МПа [9].

Основное первое преимущество легких жаростойких бетонов в том, что они дешевле аналогичных огнеупорных изделий (ниже материалоемкость, энергоёмкость). При производстве блоков и других крупногабаритных изделий производительность труда и скорость строительства увеличивается в 2-3 раза. Легкий бетон обладает удовлетворительной прочностью, тем самым из него можно изготавливать несущие конструкции, которые обеспечивают экономию огнеупоров и металла. Легкий бетон снижает расходы на ремонтные работы за

счет своего повышенного срока службы (в сравнении с обжиговыми легковесными изделиями) [9].

Жаростойкий легкий бетон применяют в различных местах, где присутствуют высокие температуры: в различных тепловых агрегатах, в конструкциях печей и трубах, в печах нефтехимии и нефтепереработки, в газоходах и дымоходных трубах, в вагонетках предприятия строительных материалов, крупных котельных установках тепловых электростанций, в печах кипящего слоя, в нагревательных колодцах, в коксовых батареях, в печах для плавки алюминия и других [9].

## **2.2 Технология легких жаростойкие бетонов**

### **2.2.1 Легкие заполнители**

Наиболее известны и изучены легкие бетоны на следующих заполнителях: вспученный вермикулит, вспученный перлит, керамзит, бой легковесных огнеупоров, легковесный корунд [9].

Вермикулит – это слюдоподобный минерал с блестящими чешуйками, который является одним из членов группы алюмосиликатов. Его можно расширить до 30 раз от первоначального объема при нагревании до 650–950 °С. Вспученный вермикулит демонстрирует перспективные свойства, такие как низкая теплопроводность, низкая насыпная плотность, износостойкость, химическая инертность и относительно высокая температура плавления. Вермикулит – это гидрослюда, которая может вспучиваться и имеет множество применений в области гражданского строительства, химической промышленности и сельского хозяйства. В этом обзоре автор обобщает предыдущие исследования, касающиеся использования вермикулита в качестве строительного материала в традиционных вяжущих материалах [3].

Перлит широко используется в качестве легкого заполнителя в бетоне или растворе. В расширенном виде перлит обеспечивает теплоизоляцию, огнестойкость и другие желаемые свойства при использовании в штукатурке на основе портландцемента или гипса. Доступность местных запасов перлита повысила интерес к его использованию в Индии, но прогресс сдерживается от-



сутствием местных знаний и стандартов. Дается краткое описание продолжающегося исследовательского проекта по заполнителя из перлита [20].

Керамзит – это пористый строительный материал получаемый путем обжига во вешающейся печи. Размеры зерен керамзита в пределах 5–40 мм. Температура обжига керамзита составляет 1100–1200 °С. Бетон из вторичного керамзита изготавливается из шлама керамзита и вторичного мелкозернистого заполнителя и, как ожидается, будет экологически эффективным легким бетоном. В данном исследовании был произведен путем включения керамзита шлама, и измельченного гранулированного доменного шлака в качестве замены крупного природного заполнителя, природного песка и цемента, соответственно. Было проведено экспериментальное исследование для оценки характеристик поверхности, потери массы, режима разрушения, остаточной прочности на сжатие и микроструктуры после воздействия повышенных температур (25 °С, 200 °С, 400 °С и 600 °С) [18].

Корундовый и шамотный легковес – это огнеупорный материал состоящий в группе глиноземистых огнеупоров. Применяют его в качестве заполнителя для легкого жаростойкого бетона. Используется их бой и вторичные (отработанные легковесы – лом футеровки) [9].

За рубежом были разработаны и описаны некоторые новые виды легких заполнителей.

Существует понятие «второжаробетон» это использование бывшего в употреблении газобетона, для дальнейшего его применения в качестве заполнителей и добавок с той же температурой как аналогичные составы жаростойких бетонов на шамотном заполнителе [9].

В этом исследовании высокоэффективные легкие заполнители (HPLWA) успешно производятся с использованием феррохромового шлака, летучей золы и бокситов в качестве сырья. Кроме того, сульфоалюминатный клинкер с высоким содержанием белита готовится и наносится на поверхность с помощью одностадийной техники спекания для получения превосходной поверхностной реакционной способности заполнителей. Результаты показывают, что приготовленный состоит из двух частей: внутренней пористой керамики,

состоящей в основном из кордиерита и шпинели, и внешних модифицированных слоев, состоящих из белита и сульфоалюмината [16].

Основная задача настоящей работы - понять влияние добавления глинозема на свойства магнево-фосфатного цемента в отношении изменений температуры, механических свойств, пористости и микроструктуры продуктов гидратации. Результаты экспериментов показали, что присутствие оксида алюминия может снизить интенсивность экзотермических реакций, а также продлить время схватывания [22].

Проведенные авторами исследования показали возможность получения пористого бетона с высокой пористостью и прочностью. Эти исследования подтолкнули авторов к попытке спроектировать бетон на основе керамического заполнителя, содержащего аэрационные добавки, который в то же время устойчив к высоким температурам, возникающим во время пожаров, а также к явлению термического и взрывного выкрашивания [21].

В следующем разделе будут описаны легкие бетоны на приведенных выше пористых заполнителях.

### **2.2.2 Виды легких бетонов**

В качестве заполнителей к легким бетонам идут керамзит, вермикулит, перлит, дробленый корундовый и шамотный легковес [9].

В НИИЖБ разработали жаростойкие бетоны на глиноземистом цементе, высокоглиноземистом цементе, на портландцементе, на быстротвердеющем портландцементе, на жидком стекле с различными отвердителями, и также на фосфатной связке. Использовали такие заполнители как вермикулит, керамзит, перлит, легковесный корунд, бой легковесных огнеупоров. Наиболее востребованными стали бетоны на основе керамзита, вспученного вермикулита или их примесей. Температура применения бетонов на ПЦ 1000 °С, а на глиноземистом цементе температура может быть в районе 1100-1200 °С. Такие бетоны имеют следующую характеристику: Средняя плотность 700-900 кг/м<sup>3</sup>, прочность при сжатии 4-5 МПа, коэффициент теплопроводности при 20 °С равен 0,18-0,25 Вт/м [12].

Бетоны на ГЦ с керамзитом и вермикулитом способны выдерживать температуру до 1200 °С, а на перлите – до 1000 °С. Средняя плотность таких бетонов 700-900 кг/м<sup>3</sup>. Прочность такого бетона на сжатие равна 2-5 МПа и сильно зависит от его плотности [12].

Для улучшения свойств вермикулитобетона в работе [9] вводили добавку метакаолина. Легкий бетон на вермикулите, цемент модифицирован добавкой метакаолина. Добавление предварительно вспененного коллоидного оксида алюминия к сверхстабильным пенам, стабилизированным Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, может быть путем к частичному противодействию усадке при обжиге этих материалов и производству макропористой керамики с меньшими порами. Тем не менее, эта система по-прежнему имеет длительное время схватывания и высокую усадку, вызванную спеканием, что затрудняет изготовление более крупных образцов и снижает ее пористость. В настоящей работе было замечено, что добавление цементной суспензии алюмината кальция и CaCO<sub>3</sub> (кальцит) к вышеупомянутой системе может ускорить ее кинетику затвердевания, улучшить ее механическую прочность и уменьшить ее усадку после обжига, сохраняя высокую пористость и меньшие поры. размеры. При использовании этих исходных материалов образцы со средним размером пор менее 60 мкм, общей пористостью более 70% и более узким распределением пор по размерам были получены после термообработки при 1600 °С в течение 5 часов. Кроме того, за счет образования гексаалюмината кальция *in situ* их усадка после спекания уменьшилась почти вдвое (с ~ 20% до 11%) [8].

Бетон на керамзите с насыпной массой 350 500 кг/м<sup>3</sup> имеет плотность 800-1000 кг/м<sup>3</sup>, прочностью бетона на сжатие в пределах 3,5-7,5 МПа. В случае применения керамзита с насыпной плотность 500-700кг/м<sup>3</sup>, плотность изменяется до 1200-1500 кг/м<sup>3</sup>, после твердения приобретает прочность на сжатие 10-20 МПа [12].

Жаростойкий керамзитобетон имеет среднюю плотность 500-700 кг/м<sup>3</sup>, и прочность составляет 10-20 МПа, соответственно может применяться как конструкционный бетон при средней плотности 1200-1500 кг/м<sup>3</sup> [12].

Для условий с высокой температурой разработали специальный вид жаростойкого бетона на основе высокоглиноземистого цемента с содержанием  $Al_2O_3$  не менее 72%. Основная особенность такого бетона это отсутствие в составе оксидов кремния и железа, которые вредно влияют на технологический процесс проходящий в тепловом агрегате. В бетон применяли легковесный корундовый заполнитель с плотностью 900-1300 кг/м<sup>3</sup>, прочность бетона 2-10 МПа [12].

В работе [1] использовали микропористые заполнители на основе магнезии 5–0,088 мм, полученные методом разложения. По химическому составу микропористые агрегаты – около 96% оксида магния. Легкий периклазоалюминатный шпинельный огнеупор (названный LPSR) был изготовлен с использованием микропористых магнезиальных заполнителей. Плотность – 2600 кг/м<sup>3</sup> даже на пористых, то есть данный заполнитель не обеспечивает получение достаточно легкого материала.

Самоуплотняющийся бетон на на шлаковой пемзе. Целью исследования [2] было создание самоуплотняющейся конструкции из композита шлак, портландцемент, активированный щелочью, с использованием легкого заполнителя для высоких температур. В качестве легкого заполнителя использовали пемзу. При 1000 °С не наблюдалось дальнейшего ухудшения прочности материала на сжатие, температура применения – около 1000 °С, прочность при сжатии до 22 МПа [2].

Перлитобетон на ПЦ может применяться до 500 °С, а тот же легкий бетон, но уже на глиноземистом цементе – может применяться до 1000 °С [9].

Легкие бетоны на жидком стекле с кремнефтористым натрием, керамзитом, вермикулитом или даже их смеси выступающей в качестве заполнителя, получают температуру применения такого бетона до 800 °С. Средняя плотность бетона достигает 600-800 кг/м<sup>3</sup>, и соответственно прочность при сжатии равна 2,5-7,5 МПа [9].

Возможны различные варианты повышения температуры применения керамзитобетона. Первый способ – это использование алюмофосфатного связующего, второй – в бетоне на жидком стекле производится замена кремне-

фтористого натрия на нефелиновый шлак или распадающийся феррохромовый шлак [9].

Однако, доступные легкие заполнители (вермикулит, перлит, керамзит) – имеют низкую температуру применения. Современные искусственные заполнители (молотый песок, зола унос, микродисперсные наполнители) имеют высокие энергозатраты при производстве, высокую стоимость и отсутствуют в продаже в России. Следовательно, наибольший интерес представляет развитие ячеистых бетонов – они не требуют легких заполнителей.

За рубежом разработаны легкие бетоны на высокоогнеупорных заполнителях (шпинель, бонит). В исследовании [17] были приготовлены легкие огнеупорные бетоны в системе бонит – глинозем – шпинель ( $CA_6 - Al_2O_3 - MA$ ) с заполнителем из бонита и различными видами шпинели (предварительно сформированной и «на месте» – формирующейся при твердении бетона). Фазовый состав, микроструктурные особенности, механические и термомеханические свойства огнеупоров  $CA_6 - Al_2O_3 - MA$ , обработанных при различных температурах [17]. Кроме того, улучшилась теплоизоляция, термостойкость и сопротивление проникновению шлака литейных изделий из шпинели на месте, в то время как прочность, смещение, стойкость огнеупора под нагрузкой и коррозионная стойкость шлака резко снизились [17].

Как предварительно формованная шпинель, так и шпинель, содержащая в литых изделиях с плотными пластинчатыми агрегатами глинозема, широко использовалась в качестве футеровки стальных ковшей ниже линии шлака, в основном из-за их высокой коррозионной стойкости к основному шлаку и отличных термомеханических свойств. Следовательно, использование относительно легкого заполнителя является потенциальным средством экономии энергии без значительного снижения устойчивости к шлаку. В настоящее время изготовление легких огнеупорных футеровок из оксида алюминия, магнезии и шпинели путем замены пористых огнеупорных заполнителей вместо традиционных плотных становится все более важной темой исследований в огнеупорной промышленности. Например, Ян с соавторами [17] изготовили пористые огнеупорные агрегаты  $MgO - Al_2O_3$  и легкие огнеупоры  $Al_2O_3 -$

MgO или  $Al_2O_3$  – шпинель, используя эти пористые агрегаты. Однако из-за высокой кажущейся пористости и большого размера пор приготовленных легких заполнителей соответствующие огнеупоры имели низкую шлакостойкость. В связи с этим, авторами был предложен другой тип микропористых агрегатов корунда с небольшими размерами пор и малой кажущейся пористостью – бонит. Бонит, основной фазой которого является гексаалюминат кальция ( $CA_6$ , где  $C = CaO$  и  $A = Al_2O_3$ ), был новым альтернативным сырьем для инновационных огнеупорных материалов [17].

Технология производства легких бетонов не имеет больших отличий от технологии производства обычного бетона. Требуется только обеспечить точное дозирование легких заполнителей и принудительное перемешивание.

### **2.2.3 Жаростойкий ячеистый бетон**

Существует два вида порообразования в первом способе это получение пористости за счет выделения газа, а во втором случае в бетонную смесь добавляют пенообразователь, который формирует пористость. Газовыделение происходит за счет реакции NaOH и алюминиевой пудры предварительно разбавленных с водой. Преимущественно лучшими свойствами обладает газобетон, он обладает большей прочностью и теплопроводностью. Газоблоки обладают хорошей паропроницаемостью, тем самым микроклимат внутри дома будет лучше чем из изделий из пенобетона. Газобетон обладает повышенной экологичностью, т.е. применение добавок в нем образуют минимальное количество газовыделения.

Применение у газобетона разнообразное – он может применяться в таких отраслях, как машиностроение, нефтеперерабатывающая промышленность, химическая промышленность, производство строительных материалов и также в металлургической промышленности [9].

Жаростойкие газобетоны различаются, как и тяжелые бетоны, по применяемым вяжущим. Он может выпускаться на: глиноземистом, высокоглиноземистом цементе, на ПЩ с разнообразными добавками, жидком стекле с отвердителями и на фосфатных связующих[9].

Иногда разделяют по группам вяжущих [9]:

– на гидравлическом вяжущем, т.е. на различных портландцементе (быстротвердеющий портландцемент, шлакопортландцемент). К ним также относится глиноземистый, высокоглиноземистый цемент и бариевый цемент.

– воздушные вяжущие (в эту группу входит периклазовый цемент и жидкое стекло).

– химические связующие (сюда входят фосфатные соединения и силкат-глыбные соединения).

Это деление достаточно условно, так как жидкое стекло часто относят к химическим связкам .

В состав газобетона входят компоненты с достаточной степенью огнеупорности. Главным компонентом обычного газобетона является портландцемент. Максимальная температура которую могут выдержать добавки и заполнители это 1200 °С, однако температура применения бетона обычно ниже [9].

Наиболее известный вид жаростойкого газобетона получают на портландцементе. Газообразователем в таком бетоне служит алюминиевая пудра, помимо нее добавляют тонкомолотые добавки которые улучшают жаростойкие свойства. Вспучивание происходит при взаимодействии извести, выделяющейся при гидратации портландцемента, и алюминиевой пудры. Добавляют тонкомолотый шамот, керамзит, золу-унос, гранулированный доменный шлак. Средняя плотность газобетона равна 600-800 кг/м<sup>3</sup> и прочность на сжатие 2,5-5 МПа. Достичь большей прочности можно за счет твердения бетона в автоклаве. Температура эксплуатации такого бетона равна 900-1100 °С [9].

Хорошими жаростойкими свойствами обладает газобетон на растворимом стекле (жидком стекле). Температура службы такого бетона 1200 °С. Плотность бетона 600-800 кг/м<sup>3</sup>. Прочность бетон после воздействия на него 1000 °С равна 2-4 МПа, а после 1200 °С 1-2 МПа, усадка при этом будет не более 2% [9].

Возможное получение газобетона на высокоглиноземистом цементе. У него температура применения 1300 °С. Основное преимущество такого бетона

что его можно изготовить на любом заводе, то есть газобетон не нуждается в автоклавной обработке [9].

При изучении использования высокоглиноземистых цементов, модифицированных метасиликатом натрия, содержащих микросферы с муллитовой оболочкой, в качестве легких геотермальных цементирующих материалов, мы обнаружили, что следующие наиболее выгодные характеристики суспензий и автоклавированных растворов при 200 и 300 °С. цементы: суспензии имеют низкую плотность <math><1,25 \text{ г / куб.см}</math>, (2) введение SMS замедляет схватывание цементов, гидрат силиката натрия, кальция и бемит образовались в матричной фазе в результате гидротермальных реакций. между цементом, и имела место благоприятная реакция между слоем муллитовой оболочки в полых микросферах с образованием фаз анальцима и бемита. Для характеристик и выраженное развитие этих фаз при 300 °С привело к образованию плотной микроструктуры в цементах и отразилось на пониженной водопроницаемости и низкой степени пористости [17].

Быстрым твердением отличается глиноземистый цемент (ГЦ). Температура применения легких бетонов на ГЦ занижается из-за низких жаростойких свойств легких заполнителей (вермикулит, перлит). Повысить температуру возможно, если получить газобетон на этом вяжущем [9].

Газообразование происходит за счет наличия в высокоглиноземистом цементе оксида с. Прочность газобетона на ВГЦ 1,2-2 МПа при средней плотности 550-650 кг/м<sup>3</sup>. После достижения температуры 1300 °С прочность газобетонных образцов снижается на 40-50% [9].

Существует также алюмофосфатный газобетон, он имеет среднюю плотность 400-800 кг/м<sup>3</sup> и прочность на сжатие 1,0-4,0 МПа. Связующим элементом служит ортофосфорная кислота и алюминиевая пудра, а в качестве заполнителей используют высокоглиноземистые и алюмохромовые отходы. Твердение бетона происходит при нормальной температуре и в результате саморазогрева. Этот газобетон может использоваться в местах с температурой применения до 1500 °С [9].



В статье рассмотрены результаты разработки огнеупорного ячеистого бетона на основе алюмофосфатного вяжущего. Он был приготовлен из шлака производства алюминия, шлака вторичной переработки алюминия и шламов травления алюминия. Выбор фосфата алюминия основан на том факте, что алюмофосфатные связующие и материалы являются наиболее тугоплавкими. В качестве заполнителей использовались огнеупорная глина, отходы производства корунда и отработанный алюмохромовый катализатор. Это дисперсные глиноземные и высокоглиноземистые промышленные отходы, не требующие дополнительных затрат на помол. Проверены основные свойства сырья. Жаростойкий фосфатный ячеистый бетон разработан на основе огнеупорной глины и отходов производства корунда, имеет рабочую температуру 1400-1600 °С. Ячеистый бетон схватывается за счет экзотермической реакции мелкодисперсного порошка алюминия и фосфатного вяжущего. Пористость образуется в результате реакции металл - фосфатное связующее. Фазовый состав фосфатных связующих исследовали после схватывания и нагревания. Приведена схема изменения фазового состава. Исследованы основные жаропрочные свойства полученного ячеистого бетона. Установлено, что полученный материал не уступает ячеистым бетонам с чистым алюмофосфатным вяжущим [20].

В статье [5] обсуждаются результаты работ по приготовлению огнеупорного бетона на основе алюмо-магнезиально-фосфатного связующего. Модификация магнезиально-фосфатного связующего алюминием позволяет повысить стабильность связующего, а также рабочую температуру материала. Выбор алюминия основан на том, что алюмофосфатные связующие являются наиболее тугоплавкими. . Разработан жаростойкий фосфатный ячеистый бетон с рабочей температурой до 1600 °С. Ячеистый бетон не требует термической обработки; его затвердевание происходит из-за экзотермической реакции металлического алюминия и фосфатного связующего. Фазовый состав фосфатного цемента исследовали после выдержки и обжига. Обнаружено влияние типа агрегата на фазовый состав. Наблюдалось более раннее образование стабильных тугоплавких фосфатов алюминия. Были испытаны основные

огнеупорные свойства ячеистого бетона. Установлено, что полученный материал не уступает ячеистым бетонам с алюмофосфатным вяжущим.

Огнеупоры боксит-SiC обладали более низкой теплопроводностью, превосходной стойкостью к воздействию щелочей и более высокими механическими свойствами по сравнению с образцами, содержащими нетронутые легкие заполнители [11].

Хотя прочность и термостойкость легких периклазошпинелевых огнеупоров изучались в гораздо меньшей степени, чем их шлакостойкость, некоторые важные результаты были получены в предыдущих исследованиях. Во-первых, когда кажущаяся пористость агрегата корундошпинелевых огнеупоров увеличилась с 4,2% до 42,0%, прочность на изгиб изменилась незначительно. В другом исследовании, посвященном легким кордиерит-муллитовым огнеупорам, превосходное межфазное соединение между матрицей и пористыми агрегатами кордиерита способствовало высокой прочности и устойчивости к тепловому удару. Основываясь на приведенном выше анализе современных легких огнеупоров, можно предположить, что легкие периклазошпинелевые огнеупоры могут иметь не только более низкую теплопроводность, но также улучшенные эксплуатационные характеристики при высоких температурах. Легкий периклазо-оксидно-алюминиевый литой материал с использованием пористых периклаз-шпинелевых агрегатов для замены магнезиальных агрегатов традиционных плотных периклаз-шпинелевых огнеупоров [12].

#### **2.2.4 Материалы для жаростойкого легкого бетона на глиноземистых цементах**

Глиноземистый цемент – это продукт из измельченного глиноземистого клинкера, относящийся к гидравлическим, быстротвердеющим вяжущим с содержанием глинозема до 50%. Получают его путем обжига сырьевой смеси бокситов и известкового компонента. Плавление и обжиг производят в доменных, электрических, вращающихся печах. В качестве заполнителей в бетонах на этом цементе обычно используют шамот в количестве 80-85% от общей массы смеси.

За рубежом значительное количество публикаций рассматривает получение бетонов на глиноземистом цементе, в частности, влияние водоцементного отношения (В/Ц) на свойства бетонов на глиноземистом связующем. Так, работа [18] была направлена на изучение процесс разрушения цементного бетона на основе алюмината кальция. Всего было отобрано 90 балок с надрезом с водоцементным отношением (В/Ц) от 0,3 до 0,55, которые были подвергнуты испытаниям на трехточечный изгиб. Как показали полученные результаты, уменьшение отношения В/Ц с 0,55 до 0,3 вызывало линейное увеличение вязкости разрушения. В этом состоянии показатель хрупкости увеличился примерно на 50%. Бетон на основе алюмината кальция (САС) - это тип НРС, в котором используется алюминатный цемент кальция (САС) вместо обычного портландцемента (ОРС) в качестве основного связующего вещества в матрице. Благодаря улучшенным свойствам САС, он широко применяется в строительной отрасли, особенно когда есть потребность в быстром затвердевании, устойчивости к химическим воздействиям (особенно кислотным воздействиям), устойчивости к истиранию и истиранию в водосбросах плотин и поверхностных покрытиях, а также теплоизоляция от высоких температур и тепловых изменений окружающей среды [18].

В работе [19] применяли заполнители из пористого оксида алюминия, были приготовлены для использования в адиабатических огнеупорах методом высокотемпературного испарения. Исследованы механические и термические характеристики пористых глиноземных тел и литых огнеупоров, изготовленных с использованием глинозема в качестве заполнителя. Образцы были изготовлены путем добавления гидроксида бора, карбоната натрия и жидкого стекла к порошкам гидроксида алюминия в различных пропорциях с последующим нагреванием при 1700 °С в течение 1 часа в восстановительной атмосфере с образованием пористых тел из оксида алюминия. Во время нагревания эти добавки образовывали фазу жидкого стекла  $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ , которая способствовала росту пластинок оксида алюминия. Можно ожидать, что пористый заполнитель оксида алюминия, изготовленный в этом исследовании, найдет практическое применение в жаростойком бетоне[19].

Остатки бокситов (красный шлак) – один из промышленных щелочных отходов производства глинозема. Из-за высокого годового производства он требует высоких затрат и обширных полигонов для его утилизации. Кроме того, из-за высокой щелочности утилизация красного шлака может вызвать серьезные экологические проблемы. Цемент является жизненно важным материалом для любого строительства и широко используется во многих странах. Основными составляющими цемента являются: известняк, кремнезем, оксид магния, оксид алюминия и оксид железа. Теоретически любой материал, содержащий все эти ингредиенты, потенциально может быть использован в качестве сырья для производства цемента [10].

Сравнительные исследования влияния нанокремнезема и NaOH в бетоне показали положительное влияние частиц NaOH на прочность на сжатие при замене 1-3 мас.% цемента. Причиной этого увеличения прочности на сжатие был расход  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  во время реакции NaOH. Фактически, присутствие частиц NaOH в качестве нанонаполнителя и их реакция с  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , которая образуется во время гидратации цемента, улучшает микроструктуру и ускоряет процесс с образованием большего количества продуктов реакции [13].

Уменьшение времени схватывания за счет использования NaOH в бетоне считается полезным для уменьшения сегрегации и флокуляции, улучшения пустот в качестве нанонаполнителя и создания пути для легкого введения связующих материалов в микроструктуру гидратационного геля, что все вместе, наконец, образуют более однородную структуру. До 6% NaOH, время начального и конечного схватывания становится меньше, и 1 мас.% NaOH в присутствии суперпластификатора является оптимальным количеством для улучшения прочности на сжатие и огнестойкости цементного теста. Микроструктура цементного раствора, содержащего наночастицы, показала, что создание слабой зоны в смеси, содержащей большое количество наночастиц, происходит из-за агрегации этих частиц. Соответственно, оптимальное количество наночастиц с хорошо однородным диспергированием не только улучшает цементное тесто, но также улучшает границу раздела между заполнителями и цементным тестом. Считается, что количество наночастиц и рас-

стояние между ними влияют на процесс кристаллизации  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , в то время как кристаллы  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  делают цементную матрицу более однородной и компактной. Увеличение количества нано- $\text{Al}_2\text{O}_3$  в качестве замены цемента ухудшает текучесть бетона, а использование более 2,0 мас.% Наночастиц, таких как нано- $\text{Al}_2\text{O}_3$ , предотвращает образование SCC. Большое количество нано- $\text{Al}_2\text{O}_3$  может снизить прочность образцов на сжатие [13].

Плотный (рабочий) и пористый (изоляционный) огнеупоры обычно используются для футеровки любых печей или обжиговых печей. Настоящее исследование позволяет получить новый легкий огнеупор из шпинели ( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ), который сохраняет как рабочие, так и изоляционные части в одном образце. Многослойные огнеупоры изготавливаются путем варьирования количества порообразующего агента (рисового порошка) и вспомогательных веществ для спекания (золы отработанной рисовой шелухи (RNA) в разных слоях. Градиент пористости создается за счет включения промежуточных слоев между изоляционным и рабочим слоем. При 1550 °C с выдержкой в течение 3 часов образец сохраняет хорошую прочность на сжатие (92,43 МПа), низкую кажущуюся пористость (8,72%), хорошую коррозионную стойкость цементного клинкера в рабочем слое наряду с разумной прочностью (31,72 МПа) и низкой теплопроводностью (0,146 Вт / м · К) в изоляционном слое. Эти многообещающие результаты могут подтолкнуть производителей огнеупоров к разработке легких многослойных огнеупоров для цементных печей. В настоящей работе исследуется новый подход к разработке нового типа многослойного шпинелирующего ( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ) огнеупора, который сохраняет комбинацию как плотной (рабочей), так и пористой (изоляционной) части в одном образце. Отработанная зола рисовой шелухи (ЗРП) и рисовая пудра используются как агенты спекания и порообразователи соответственно. Особое внимание уделяется технологическим параметрам маршрута изготовления многослойного огнеупора, а также физико-механическим, а также тепловым свойствам приготовленного шпинельного огнеупора. Испытание плотного слоя цементного клинкера на коррозионную стойкость кратко обсуждается в дополнительном материале [14].

Результаты доказывают, что богатая кремнием фаза, полученная во время высокотемпературного обжига, образует муллит, реагируя с порошком корунда в матрице. Из-за диффузии жидкой фазы, богатой кремнием, в матрицу и растворения  $Al_2O_3$  в жидкой фазе, богатой кремнием, кристобалит непрерывно растворяется в жидкой фазе, богатой кремнием, и оставляет отверстия в исходном положении, тем самым удовлетворяя потребности муллитизации. Легкий муллитокорундовый огнеупор с высокой прочностью на сжатие (85,0 МПа), высокой огнеупорностью под нагрузкой (1636 °С) и низкой теплопроводностью (1,55 Вт (м · К) <sup>-1</sup>) был получен путем регулирования размера частиц кварца с добавлением содержания и температура обжига [15].

### *Выводы*

1. Легкие штучные огнеупоры – сложны в технологии, требуют обжига и не позволяют получать изделия крупного размера.
2. Легкие жаростойкие бетоны позволяют снизить тепловые потери и эффективны как теплоизоляционный материал при высоких температурах, они не требуют обжига.
3. Температуры применения легких бетонов недостаточно высоки из-за низкой огнеупорности легких заполнителей.
4. Быстрое твердение легким бетонам обеспечивают цементы на основе алюминатов кальция – в особенности глиноземистый цемент.
5. Газобетоны эффективнее легких бетонов, так как для их производства не нужен пористый огнеупорный заполнитель.
6. Жаростойкий газобетон на вяжущем из глиноземистого цемента не производится, нет современных данных по получению такого бетона со средней плотностью 800-900 кг/м<sup>3</sup> и ниже.
7. Так как в глиноземистом цементе при взаимодействии с водой не выделяется щелочь, для получения газобетона нужно вводить в глиноземистый цемент добавку щелочи.
8. Следует исследовать вопрос – как влияет добавка щелочи на твердение глиноземистого цемента.

9. Для получения газобетона обычно используют добавку-газообразователь – пудру алюминиевую, количество пудры по литературным данным – около 1% от массы цемента.

10. Наиболее распространенный заполнитель для ячеистого бетона с температурой применения 1000-1400 °С – шамотный.

9. Наиболее простая и часто используемая технология получения жаростойкого газобетона – литьевая, без применения вибрации.

11. Перспективным является получение жаростойкого газобетона, не требующего тепловой обработки – на глиноземистом цементе и шамотном заполнителе.

### **3 ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ**

#### Цель работы

Целью нашей работы является разработка модифицированного глиноземистого цемента и на его основе – жаростойкого газобетона на шамотном заполнителе.

#### Задачи

1. Изучить основные виды и свойства жаростойких легких бетонов, вяжущих веществ и заполнителей, применяемых для производства, выделить перспективные направления развития легких жаростойких бетонов.
2. Изучить методики определения свойств жаростойких бетонов.
3. Изучить свойства исходных материалов (цемент, шамотный заполнитель).
4. Получить модифицированный глиноземистый цемент, изучить влияние щелочи NaOH на его схватывание и твердение.
5. Исследовать влияние добавки щелочи и жидко-твердого отношения на свойства газобетона.
6. Разработать составы легкого бетона – жаростойкого газобетона с прочностью 1,5-3 МПа и с температурой применения не менее 1200 °С.
7. Исследовать влияние плотности газобетона на его прочность в 3 и 7 сут. твердения.
8. Изучить основные жаростойкие свойства газобетона на глиноземистом цементе и шамотном заполнителе.
9. Выполнить оценку экономической эффективности разработанного материала – жаростойкого газобетона на глиноземистом цементе.



## 4 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 4.1 Исходные материалы

#### 4.1.1 Заполнители

В качестве заполнителей для жаростойкого бетона применяют обожженные и необожженные горные породы. Для производства жаростойких бетонов в нашей стране широко используются вторичные огнеупоры и шлаки металлургических производств.

По фракционному составу заполнитель для бетонов подразделяют на:

- мелкий – песок с зернами размером от 0 до 5 мм;
- крупный – щебень с зернами размером от 5 до 20 мм.

Шамот – это штучные изделия или заполнитель состоящий из обожженной огнеупорной глины. Получают шамот путем обжига в вращающихся или шахтных печах при температуре 1300 °С.

Обожженный шамот дробят и измельчают до получения нужного зернового состава. После добавляют добавку-отощитель который уменьшает пластичность и усадку при обжиге.

Использованный в работе шамот имеет предельно допустимую температуру применения – 1400 °С. Водопоглощение его должно соответствовать то есть быть не больше 8% по массе согласно ГОСТ 23037-99.

Необходимо контролировать зерновой состав и фракционировать заполнитель из шамота для получения требуемого модуля крупности [6].

Таблица 1 – Зерновой состав шамота (мелкий заполнитель)

Вид заполнителя	Фракция заполнителя					
	Менее 0,16	0,16-0,315	0,315-0,63	0,63-1,25	1,25-2,5	2,5-5
Требования (полные остатки)	не нормируется	80-100	70-95	40-70	20-55	10-30
Шамот Сухо-ложский (полные остатки)	–	96,3	73,6	35,7	21,3	–
Шамот, использованный в работе	–	92,4	77,2	37,9	10,3	–

Заполнитель по зерновому составу соответствует требованиям СНиП 3.09.01-85 [7].

В работе был использован составленный шамот с зерновым составом по таблице 1. Шамот – суходоложский, фракции 0-2 мм. Содержание мелких фракций в шамоте было увеличено, так как для получения газобетона необходимо или вводить добавку тонкомолотого шамота, или увеличивать содержание мелкой фракции шамота.

Насыпная плотность шамота –  $1,37 \text{ кг/м}^3$ .

Химический состав. Для шамота нормируется содержание глинозема, для шамота высокого качества – содержание оксидов железа и титана.

В работе был использован шамот класса Б, огнеупорность не менее  $1630 \text{ }^\circ\text{C}$ , содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – не менее 28%. Это удовлетворяет требованиям к шамотному заполнителю для жаростойкого бетона – огнеупорность не менее  $1580 \text{ }^\circ\text{C}$  [11].

В целом заполнитель удовлетворяет требованиям стандарта ГОСТ 23037-99 к заполнителю типа ЗШБ.

#### **4.1.2 Цемент**

Глиноземистый (алюминатный) цемент – быстротвердеющее минеральное вяжущее вещество, продукт тонкого измельчения клинкера, получаемого обжигом (до плавления или спекания) сырьевой смеси, состоящей из бокситов и известняков [7].

По содержанию в глиноземистом цементе  $\text{Al}_2\text{O}_3$  подразделяют на виды:

- глиноземистый цемент (ГЦ);
- высокоглиноземистый цемент I (ВГЦ I);
- высокоглиноземистый цемент II (ВГЦ II);
- высокоглиноземистый цемент III (ВГЦ III).

Содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в ГЦ не менее 35%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – не более 5,5%.

Граница между ГЦ и ВГЦ – 50%. Цементы, содержащие до 50% глинозема, относят к глиноземистым. По прочности при сжатии в возрасте 3 сут глиноземистые цементы подразделяют на марки:

ГЦ-40, ГЦ-50, ГЦ- 60.

В работе был использован модифицированный глиноземистый цемент марки ГЦ-50 (с пределом прочности при сжатии не менее 50 МПа). Цемент производства Пашийского цементно-металлургического завода. Выбор вызван тем, что цемент марки «40» имеет меньшую прочность, для легких и ячеистых бетонов важно получить максимальную прочность, а она зависит от плотности материала и прочности цементного камня.

Глиноземистый цемент может содержать до 50 % глинозема. Характерными для алюминатных цементов химическими соединениями, клинкерными минералами, обеспечивающими гидравлическое схватывание и твердения являются алюминаты кальция. В зависимости от соотношения  $\text{CaO}:\text{Al}_2\text{O}_3$  в системе  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$  образуются такие минералы как  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\text{C}_3\text{A}$ ),  $12\text{CaO}\cdot7\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\text{C}_{12}\text{A}_7$ ),  $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\text{CA}$ ),  $\text{CaO}\cdot2\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\text{CA}_2$ ) и бонит  $\text{CaO}\cdot6\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\text{CA}_6$ ).  $\text{CA}$  и  $\text{C}_{12}\text{A}_7$  – основные минералы ГЦ, причем важнейший минерал –  $\text{CA}$ . Кроме этого, в ГЦ может формироваться геленит  $\text{C}_2\text{AS}$ , часть кремнезема образует  $\text{C}_2\text{S}$  в бета-форме. При большом содержании глинозема в нем также содержится  $\text{C}_{12}\text{A}_7$  и в небольших количествах.

Глиноземистый цемент набирает до 70 % марочной прочности в первые сутки твердения. Он является быстротвердеющим вяжущим веществом. Данный материал особо привлекательный в производстве жаростойких материалов из-за малого количества необходимого времени для получения готового продукта. Это важная особенность для газо- и пенобетонов. Результаты испытаний использованного в работе цемента показаны в таблице 2.

Таблица 2 – Набор прочности модифицированного глиноземистого цемента

ГЦ	Прочность при сжатии, МПа		
	2 сут.	3сут	7 сут.
	47,4	53,7	68,1

Нормальная густота цемента составила 28,25% (не нормируется для цемента). Сроки схватывания – начало схватывания 55 мин, конец схватывания – 1 ч 30 мин (удовлетворяет требованиям ГОСТ 969-2019).

Тонкость помола цемента определяли по величине удельной поверхности 3120 см<sup>2</sup>/г на приборе типа ПСХ – прибор ПСХ 12 SP2.

#### **4.1.3 Едкий натр NaOH**

В нашей работе для вспучивания газобетона вводили добавку щелочи, так как при гидратации ГЦ щелочь почти не выделяется. Был использован «натр едкий чешуированный», марки «ТР» с содержанием гидроксида натрия не менее 98,5 %. NaOH соответствует ГОСТ Р 55064-2012 [4]. В работе он дозировался в сухом виде, после чего затворялся водой для приготовления раствора (и тщательно перемешивался) – в виде раствора 10%-ной концентрации. Использовали раствор для более однородного распределения щелочи, а кроме этого – сухая щелочь медленно растворяется в бетонной смеси.

#### **4.1.4 Алюминиевая пудра**

В работе, чтобы получить выделение газа и вспучивание – использовали алюминиевую пудру марки ПАП-1.

При этом, в смеси материалов протекает химическая реакция между щелочью и алюминиевой пудрой, сопровождающаяся выделением газа (водорода) и вспучиванием смеси:



Пудра соответствует ГОСТ 5494-95 6. Пудру добавляли в смесь в виде суспензии. Для приготовления суспензии сначала было необходимо размешать в емкости стиральный порошок с водой до получения раствора. После чего в «мыльную» воду добавляется пудра, и перемешивается до однородного на вид состояния. Стиральный порошок применялся для удаления защитного слоя и парафина с частичек алюминиевой пудры – чтобы улучшить взаимодействие пудры со щелочью.

#### **4.1.5 Материал для подготовки пудры алюминиевой**

Для подготовки пудры алюминиевой – для снятия защитного покрытия с поверхности частиц алюминия – в технологии ячеистых бетонов применяют поверхностно-активные вещества, например, стиральный порошок.

В работе использовали стиральный порошок «МИФ». В состав порошка входят анионы ПАВ 5-15%, неионогенные ПАВ менее 5%, парбоксилаты, энзимы, бензилсалицилат, гексилкоричный альдегид. Применялся в работе для снятия покрытия с алюминиевой пудры. Порошок соответствует требованиям ГОСТ 22567.15-95. В своих замесах использовали 0,35 грамм, это составляет 0,067% от массы цемента и 0,025% от массы замеса.

#### **4.2 Требования к выполнению испытаний**

Условия твердения для бетонов на ГЦ. Температура твердения изделий из глиноземистого цемента должна быть в пределах 7-25°С с относительной влажностью 90%, время твердения изделий составляет 3-е суток. Процесс твердения должен полностью проходить в защищенном месте от внешних факторов (ветер, солнечный свет). Для ускорения твердения изделий на ПЦ необходимо применять тепловую обработку, то есть помещать изделия в тепловую камеру. Рекомендуемый прогрев изделий при температуре 80 °С должен составлять 10-12 часов. Максимальная температура при которой можно прогреть бетон составляет 50-100 °С и продолжительность прогрева при этой температуре составляет 2-6 часов. Для глиноземистого цемента, твердеющего быстро, термообработка не требуется. Таким образом, газобетон не требует термообработки (сушки, тепловлажностной обработки, обжига). Распалубливание изделий необходимо производить не раньше чем через 2-е суток [7].

В работе использовали стандартные для ячеистых и жаростойких бетонов методы, приведенные в нормативной литературе [11].

### 4.3 Методы испытаний

Для приготовления газобетона мы брали шамот (три вида), глиноземистый цемент, алюминиевую пудру  $Al_2O_3$ , стиральный порошок, щелочь NaOH. Сначала мы дозировали 3 вида шамота и глиноземистый цемент в нужном количестве. Потом в отдельную емкость отлили немного воды после чего туда поместили отвешенную щелочь и размешивали до полного растворения в воде NaOH. Потом в отдельную емкость отлили небольшое количество воды, где размешали до полного растворения частиц порошка. У нас получилась мыльная вода, куда мы добавляем нужное количество алюминиевой пудры и размешиваем до однородного состояния. После приготовления суспензии из алюминиевой пудры и порошка мы начинаем смешивать 3 вида шамота и глиноземистый цемент. Когда сухая смесь станет однородной, мы выливаем воду из пробирок и размешиваем втирающими и круговыми движениями. После получения бетонной смеси без добавок мы добавляем из емкости щелочь с водой, после чего тщательно перемешиваем и после того как перемешали, добавляем суспензию состоящую из алюминиевой пудры, воды и стирального порошка. Перемешиваем все компоненты круговыми движениями и заливаем в форму. Стиральный порошок в нашей смеси служит для снятия жирного слоя с алюминиевой пудры. Щелочь служит как главный компонент газообразования за счет реакции с алюминиевой пудрой. Для каждого состава мы делали несколько образцов газобетона в соответствии с требованиями ГОСТ 20910-2019 [1].

Образцы. В работе использовали образцы-кубы с ребром 70 мм по ГОСТ 20910-2019 [1]. Исходя из требований ГОСТа, все образцы газобетона получают из единого монолита (сечением 100x100 мм), путем выпиливания образцов нужных размеров в нашем случае (сечением 70x70 мм).

Твердение. Все заформованные образцы выдерживались в защищенном месте от внешних факторов в течении 3-х суток, после чего производилась разборка формы. Твердение происходило неавтоклавным способом, в нормальных условиях при температуре 20 °C и влажности воздуха 100%.

После распалубки вырезали образцы путем выпиливания. Готовые образцы сначала осматривались визуально на наличие дефектов, после чего образцы газобетона взвешивали и измеряли длины сторон – размеры как среднее арифметическое 2-х измерений во взаимоперпендикулярном положении..

Сушка. После того как мы получили результаты измерений массы и размеров, мы подвергаем образцы термической обработке, т.е помещаем наши кубики газобетона в тепловую камеру на 70 °С. Образцы выдерживаются в камере в течении суток до постоянной массы. На вторые сутки температуру увеличивали с 70 °С до 105 °С, общее время сушки – 2 сут. При этом удаляется сорбционная вода, происходит сушка, сопровождающаяся усадкой. На 4-е сутки образцы достаются из камеры, и подвергаются теми же замерах как и до сушки (замер массы образца и замер размеров).

Следующий этап после сушки это – срезание горбушки у образцов, тем самым мы получили полностью прямоугольные образцы. Производим замер высоты кубика и вес образца без горбушки.

Обжиг. Для обжига мы отбираем оптимальные по плотности (700, 800 и 1000 кг/м<sup>3</sup>) составы газобетона. Обжиг образцов-кубов производится при 600 °С и 800 °С, а также при температуре применения. Нагрев проводили с рекомендуемой для ячеистых бетонов скоростью, в электрической муфельной печи. После обжига образцы осматривали, трещин и иных дефектов – не обнаружилось.

Режим нагрева – от 100 до 200 °С – со скоростью 30 С/час, до 500 °С – 60 °С/час, далее – 100 °С/час. Режим охлаждения – вместе с печью.

Средняя плотность газобетона определяется по сумме плотностей образцов бетона, получаемых в результате испытаний.

Усадка – изменение объема и размеров образца и их изменения в процессе сушки и обжига. В газобетоне проходит в следствии испарении воды из материала. Процесс усадки наблюдается после воздействия высоких температур, т.е. после сушки и обжига. В момент сушки происходит процесс испарения адсорбционной воды, тем самым уменьшаются размер пор и в следствии чего уменьшается и размер образца. Соответственно процесс усадки будет

меньше у более плотных образцов. Автоклавный способ сушки с паровлажной средой, более подходящий для газобетона. Так как поры насыщаются частичками воды, тем самым они не дают изменяться структуре газобетона.

Усадку после сушки определяют по формуле

$$\text{Усадка} = (l_2 - l_1) / l_2, \quad (1)$$

где,  $l_1$  – размер ребра образца до сушки;

$l_2$  – размер ребра образца после сушки.

Формула для определения усадки после обжига – аналогична.

Остаточная прочность после обжига определяется как отношение прочности бетона при температуре 800 °С и ее фактической прочности после сушки.

$$R_{ост} = R_{800сж} / R_{сж,сушка} * 100\% \quad (2)$$

Предельная температура применения определялась по величине 2%-ной усадки образцов-кубов после обжига и охлаждения (принято для легких и ячеистых бетонов) [1][12].

Все образцы, которые мы подвергали обжигу и сушке, будут испытываться на прочность при сжатии. Определение предела прочности при сжатии проходит на образцах кубиках, подверженных термической обработке. Образцы должны быть полностью высушенными до постоянной массы. После чего они испытываются на прочность на гидравлическом прессе. Прочность в первую очередь будет зависеть от плотности образца газобетона. Следующим фактором будет температура обработки – это может быть сушка или обжиг.

Коэффициент вариации – это среднеарифметическое значение любых 30 последних серий одного вида. Например, определение прочности бетона одного класса. В случае если значение коэффициента будет превышать 8%, то результаты испытаний можно не учитывать. Сначала определяется среднее значение, то есть происходит вычисление грубой ошибки. Грубая ошибка вычисляется путем сравнения расчетной величины  $R_{расч}$  и критерия максимального отклонения  $R_{max}$ . После этого проводится анализ наличия второй грубой ошибки в этой серии. В случае с вторым способом делается сравнение таб-



личного значения  $a_m$  с расчетным  $a_{расчетное}$ . Если в результате будет неравенство  $a_{расчетное} \geq a_m$ , то выявляется грубая ошибка.

Критерий Фишера применяется при неравенстве числа повторов в серии. С помощью этого критерия можно определить однородность дисперсии, если критерий Фишера  $F$  меньше табличного критического значения  $F_{кр}$ , то оценки дисперсий будут однородны.

Планирование эксперимента это – выбор числа проведения опытов для решения задач с требуемой точностью. Суть эксперимента заключается в поиске более оптимальных условий реализации. Для нас задачей стоит получения максимально эффективных результатов нашего эксперимента. Тем самым надо подобрать концентрации веществ и другие факторы, чтобы результат был положительным.

## 5 ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЧАСТЬ

### 5.1 Модифицирование глиноземистого цемента

Так как в глиноземистом цементе при взаимодействии с водой щелочные соединения не образуются, в смесь вводят щелочь. Можно рассматривать такой глиноземистый цемент как модифицированный щелочью (NaOH). Поэтому нами был изучен вопрос – как влияет добавка щелочи на твердение глиноземистого цемента. Для этого готовили стандартные образцы-балочки по ГОСТ 969 с изменениями – не с постоянным водо-цементным отношением, а из цементно-песчаной смеси стандартной консистенции. Образцы твердели в нормальных условиях. Расход добавки – 0,8, 1 и 1,2% - так как известно, что для вспучивания нужно ввести около 1% щелочи.

Влияние добавки щелочи следующее. В 2 сут твердения предел прочности со щелочью выше, чем без нее, на 15-30% (таблица 3). То есть добавка выполняет роль как ускорителя твердения. В 3 сут твердения – все дозировки щелочи тоже дают рост прочности. Добавление щелочи в количестве 1,2% – прирост прочности в 3 сут меньше, чем при 1%, значит, избыток щелочи вредно влияет на твердение. К 7 сут показатели прочности цемента модифицированного сопоставимы с прочностью цемента без добавки щелочи.

Таблица 3 – Влияние дозировки NaOH на прочность газобетона

Вяжущее	Прочность при сжатии, МПа		
	2 сут.	3 сут.	7 сут.
ГЦ	42,4	53,7	58,1
ГЦ+NaOH 0,8%	49,5	55,2	58,7
ГЦ+NaOH 1%	52,1	59,4	59,6
ГЦ+NaOH 1,2%	54,6	57,3	59,5

### 5.2 Текучесть газобетонной смеси

Для получения оптимальных составов газобетона на вяжущем – глиноземистом цементе – было изучено, как воздействует количество газообразова-

теля (пудры алюминиевой), щелочи и количество воды затворения. Воду затворения меняли в зависимости от требуемой текучести в пределах жидко-твердого отношения (Ж/Т) от 0,288 до 0,307. Жидко-твердое отношение – это отношение количества воды, в кг, к суммарному количеству всех сухих компонентов.

Алюминиевая пудра – добавлялась в количестве 0.65% от массы цемента.

При меньшем расходе пудры – газобетон плохо вспучивается, плотность его – 1000 кг/м<sup>3</sup> и более.

При большем расходе пудры – происходит сильное вспучивание с разрывом «горбушки». Поэтому количество пудры – опытным путем было принято в пределах 0,65% от массы цемента.

Расход щелочи – принимали в процентах от массы цемента, в пределах 0,84–1,26%. При более низком расходе щелочи – газобетон плохо вспучивается, это было определено опытным путем.

### **5.3 Подбор составов и определение основных характеристик газобетона**

На рисунке 1 представлено изменение плотности образцов газобетона после сушки до 200 °С с различным жидко-твердым отношением. Построены кривые – зависимости плотности материала от количества щелочи в бетоне.

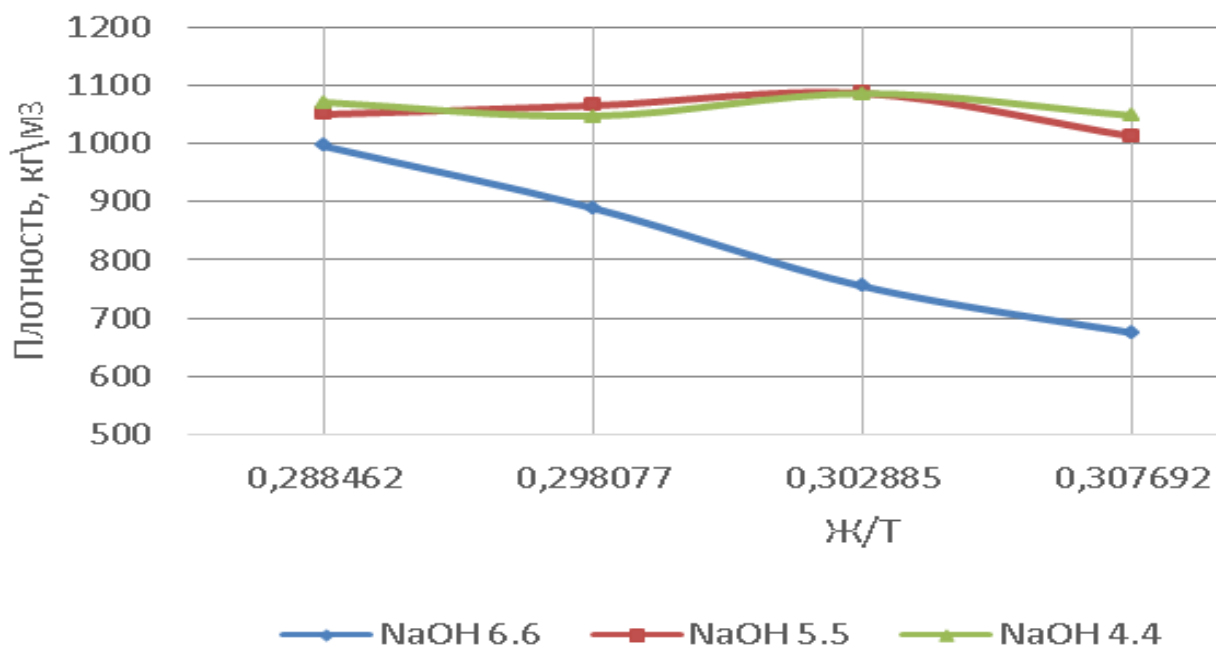


Рисунок 1 – График зависимости плотности от Ж/Т и щелочи в количестве 0,84%, 1,05%, 1,26% от массы цемента

На графике видно, что с увеличением Ж/Т отношения плотность газобетона уменьшается. Также можно заметить, что плотность материала возрастает с уменьшением в газобетоне содержания NaOH. То есть, чем больше в газобетоне содержание щелочи, тем плотность у них будет ниже. На графике видно, что наименьшей плотностью будут обладать образцы газобетона с Ж/Т равным 0,307 л/кг и с 1,27% содержанием NaOH. Плотности образцов газобетона с содержанием едкого натра 1,05% и 1,26% от массы цемента практически одинаковые имеют диапазон от 1012,5 до 1070 кг/м<sup>3</sup>.

На рисунке 2 представлен график зависимости NaOH и плотности. Из графика видно как изменяется показатель плотности от количества Ж/Т.

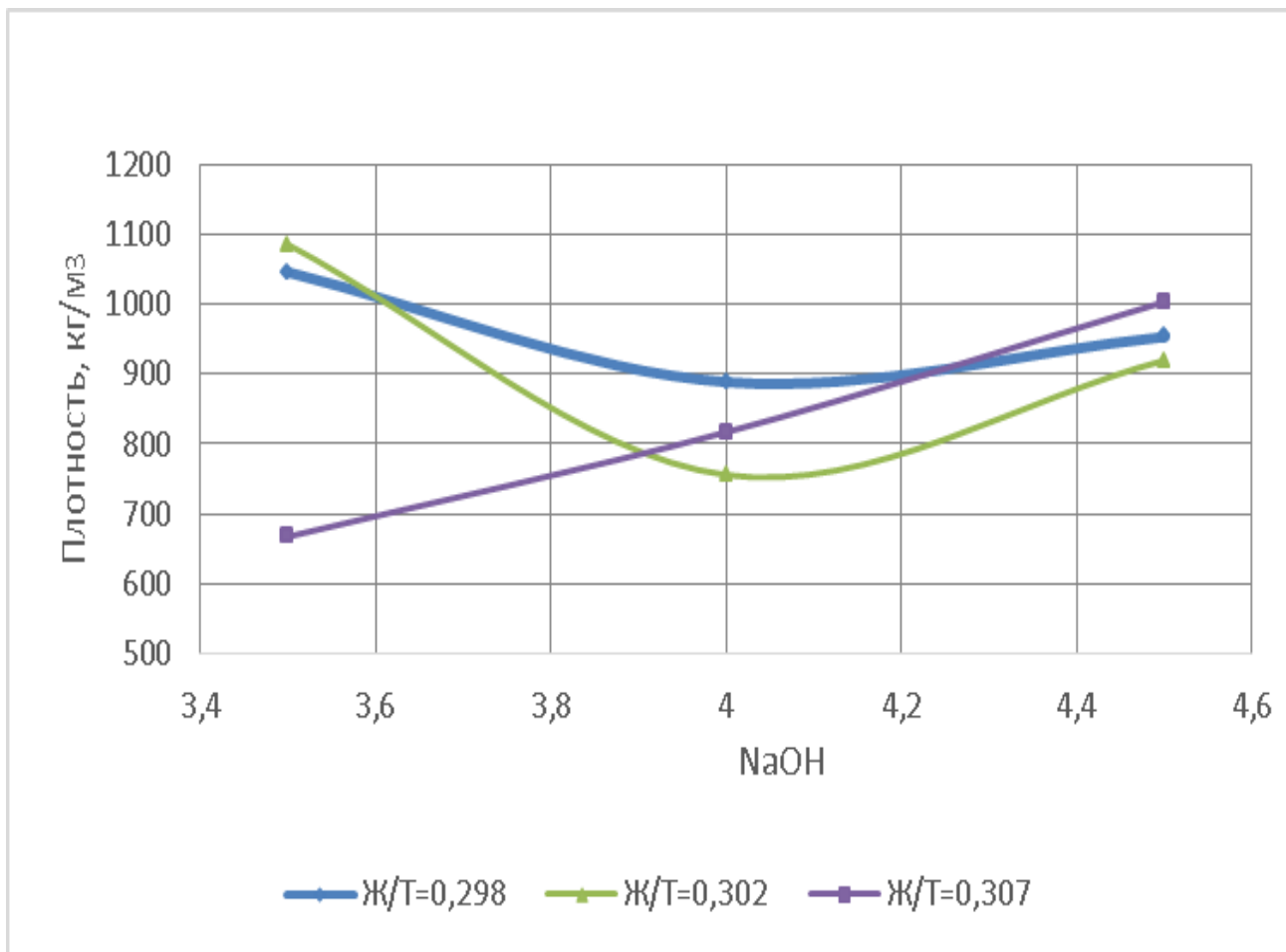


Рисунок 2 – График зависимости плотности от NaOH. Влияние Ж/Т на плотность

Из графика, предоставленного на рисунке 2 видно, что наиболее стабильные результаты получаются с содержанием едкого натра 0,86% от массы цемента. Самые плотные образцы получаются с содержанием щелочи 0,84% от массы цемента, за счет этого получают более прочные образцы, но и более тяжелые, что для нас нежелательно. Кривые имеют при содержании щелочи 1,05% более низкую плотность. Это связано с тем, что для всех 3-х кривых содержание едкого натра в количестве 1,05% от массы цемента самое оптимальное, процессы вспучивания протекают наилучшим образом.

На рисунке 3 представлен график зависимости предела прочности при сжатии газобетона на цементе ГЦ-50 в зависимости от его плотности.

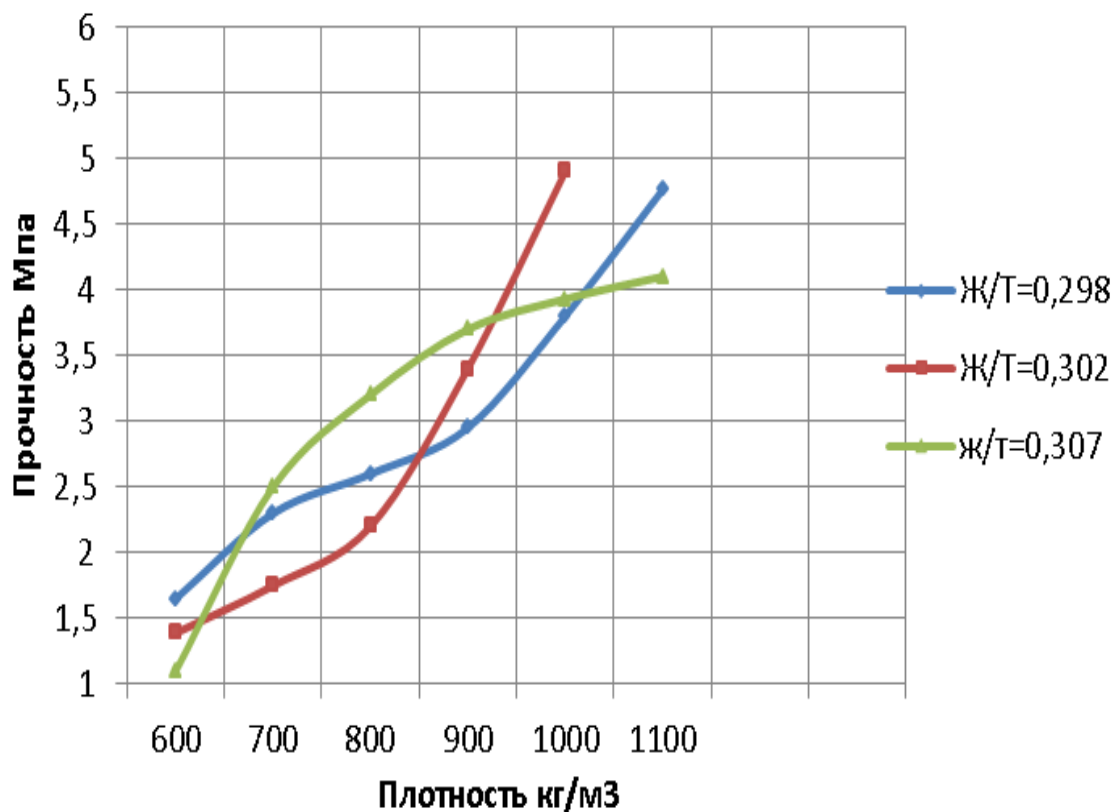


Рисунок 3 – График зависимости прочности от Ж/Т (после сушки, на 3 сутки)

На графике, предоставленном на рисунке 3 видно, что все три кривые прочности равномерно возрастают с увеличением плотности. При Ж/Т=0,302 л/кг минимальная плотность составляет  $600 \text{ кг/м}^3$  при прочности 1,4 МПа. Характер изменения прочности при Ж/Т 0,298 похож, однако прочность несколько выше в области 600-850 °С. Однако, при дальнейшем повышении плотности угол наклона кривой уменьшается, прочность – ниже, чем при Ж/Т 0,302. Таким образом, наилучшим является Ж/Т в интервале 0,302-0,307. Для более тяжелого бетона – с плотностью  $900 \text{ кг/м}^3$  и выше – оптимальным является Ж/Т 0,302.

На рисунке 4 представлен график зависимости прочности газобетона на 3-е сутки от его плотности (при Ж/Т, равном 0,302).

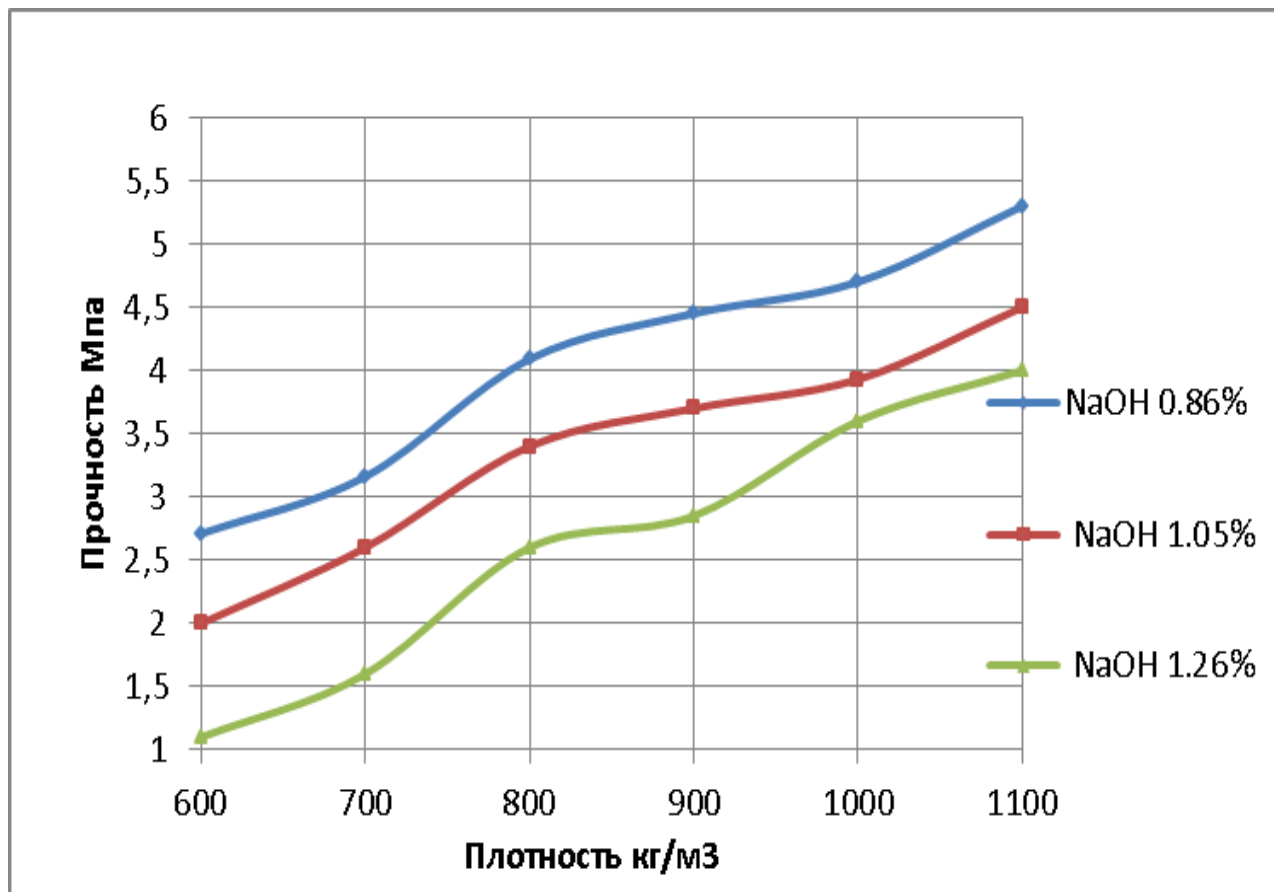


Рисунок 4 – График зависимости плотности и прочности от количества NaOH (3-е сутки твердения)

На данном графике можно заметить, что кривая с содержанием щелочи 1,26% от массы цемента, имеет плавный прирост прочности с увеличением плотности. Кривая с содержанием 0,84% и 1,05% щелочи от массы цемента имеют плотность более 1000 кг/м<sup>3</sup>. По графику можно сказать, что самая маленькая плотность и прочность будет у образца с содержанием 1,26% щелочи от массы цемента. Его плотность будет равна 676,8 кг/м<sup>3</sup> а прочность будет 1,65 МПа. С увеличением плотности пропорционально увеличивается его прочность.

Образцы, подвергнутые обжигу при температурах 600 и 800 °С имеют прочность от 1,15 до 2,25 МПа. Плотность обожжённого газобетона от 800 до 950 кг/м<sup>3</sup>. Исходя из этого графика можно сказать, что чем ниже в газобетоне Ж/Т тем его плотность будет больше, это связано с химически связанной водой которой будет больше в структуре цементного камня.

На рисунке 5 изображен график зависимости прочности от повышения температуры. Представлены образцы газобетона с плотностью  $750 \text{ кг/м}^3$  и  $900 \text{ кг/м}^3$ .

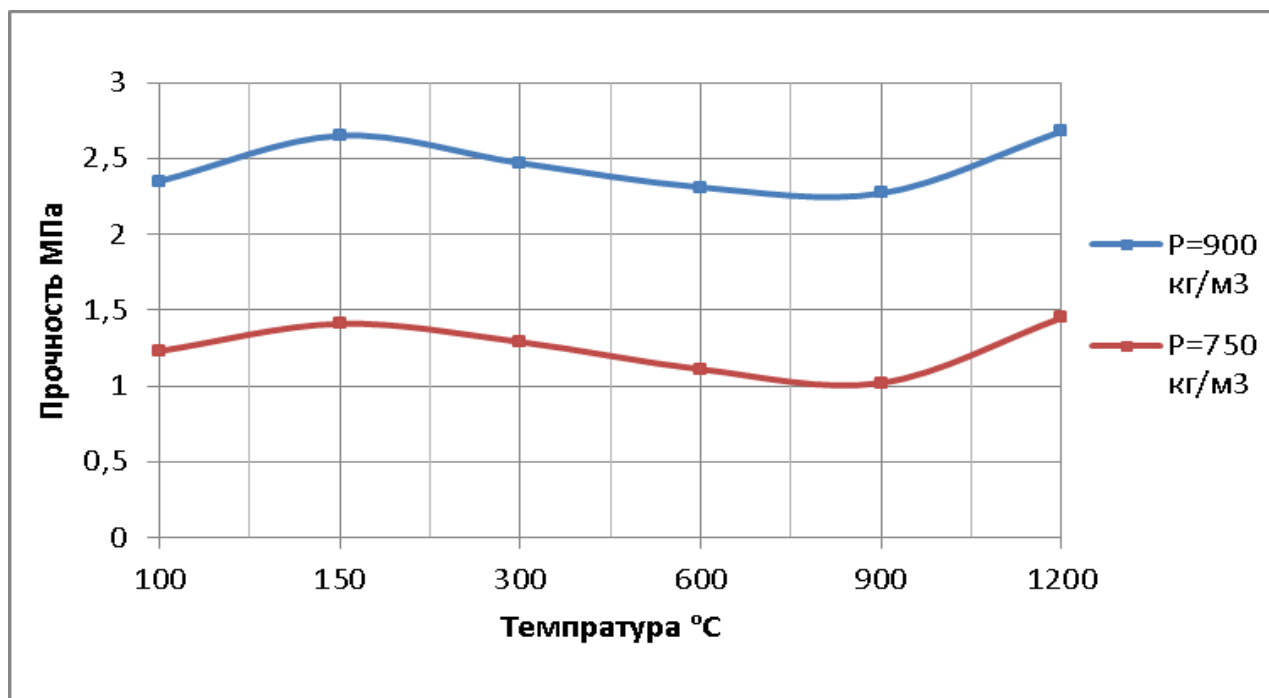


Рисунок 5 – График зависимости влияния температуры обжига на предел прочности образцов плотностью  $750 \text{ кг/м}^3$  и  $900 \text{ кг/м}^3$

В промежутке температур от  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  можно заметить подъем прочности – это связано с упрочнением структуры газобетона. Процесс сушки и уплотнения заканчивается при температуре  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ . После чего протекает процесс разложения продуктов гидратации цемента, все это происходит до температуры  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ . Полное разложение гидроалюминатов заканчивается на  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ . Далее замечен рост прочности это связано с процессом спекания в цементном камне. Такие графики соответствуют ячеистым бетонам на шамотном заполнителе. Графики проходят практически параллельно относительно друг друга. Резких отклонений не наблюдается потому, что выбранные составы близкие по своей плотности. Максимальная прочность образца с плотностью  $750 \text{ кг/м}^3$  будет равна  $1,5 \text{ МПа}$ . Образец с плотностью  $900 \text{ кг/м}^3$  может достигнуть прочности  $2,7 \text{ МПа}$ .



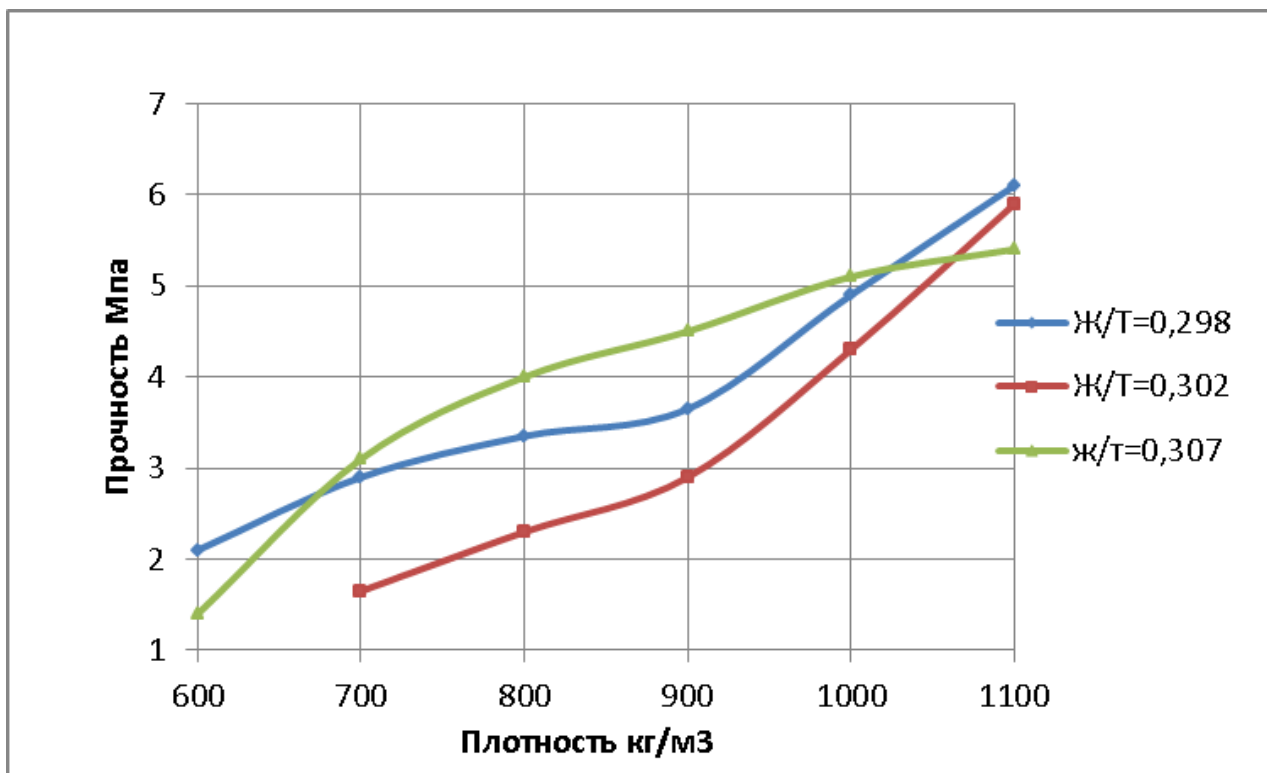


Рисунок 6 – График зависимости прочности от Ж/Т (после сушки, на 7 суток)

График зависимости плотности и прочности газобетона от Ж/Т отношения в возрасте 7 сут твердения показан на рисунке 6. Характер зависимости похож на прочность в 3 сут сроки твердения [8]. На графике видно, что все три кривые показывают равномерное, линейное повышение прочности материала с увеличением плотности. При Ж/Т=0,302 л/кг минимальная плотность составляет  $700 \text{ кг/м}^3$  при прочности 1,65 МПа. Характер изменения прочности при Ж/Т 0,298 похож, однако прочность несколько выше в области 600-850 °С. При дальнейшем повышении плотности угол наклона кривой уменьшается, прочность – ниже, чем при Ж/Т 0,302. Таким образом, наилучшим является Ж/Т в интервале 0,302-0,307. Для более тяжелого бетона – с плотностью  $900 \text{ кг/м}^3$  и выше – оптимальным является Ж/Т соотношение 0,298, а для плотности 900 – соотношение, равное 0,307.

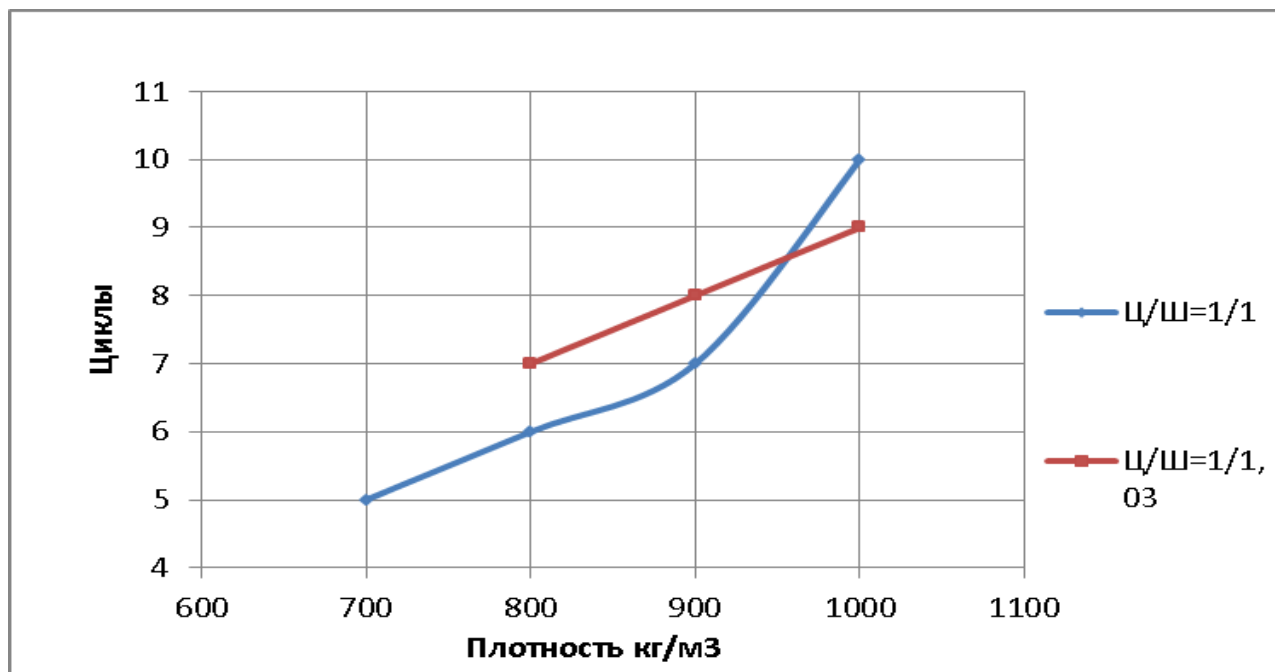


Рисунок 7 – График зависимости плотности от количества температурных циклов

На рисунке 7 показано, как меняется термическая стойкость с повышением плотности материала. Термостойкость растет – чем плотнее материал, тем она выше. Максимальное значение составляет 10 воздушных теплосмен (для газобетона со средней плотностью 1000 кг/м<sup>3</sup>).

На данном графике можно заметить как цементно/шамотное отношение может сказаться на количестве циклов термостойкости. Отношение Ц/Ш = 560/560 как 1/1 начинается в точке 700 кг/м<sup>3</sup> и ровняется это 5-и циклам. После чего начинается подъем с таким же набором до 900 кг/м<sup>3</sup>, после этого меняется угол подъема и достигает точки 10 циклов при плотности 1000 кг/м<sup>3</sup>.

Вторая линия на графике является отношением Ц/Ш=580/560 – можно представить как 1,03/1. Начальная точка будет при плотности 800 кг/м<sup>3</sup> и 7 циклах термостойкости. Подъем длится до плотности 1000 кг/м<sup>3</sup> и достигает значения 9 циклов.

По результатам из таблицы построим график зависимости сроков твердения (суткок) и прочности при сжатии.

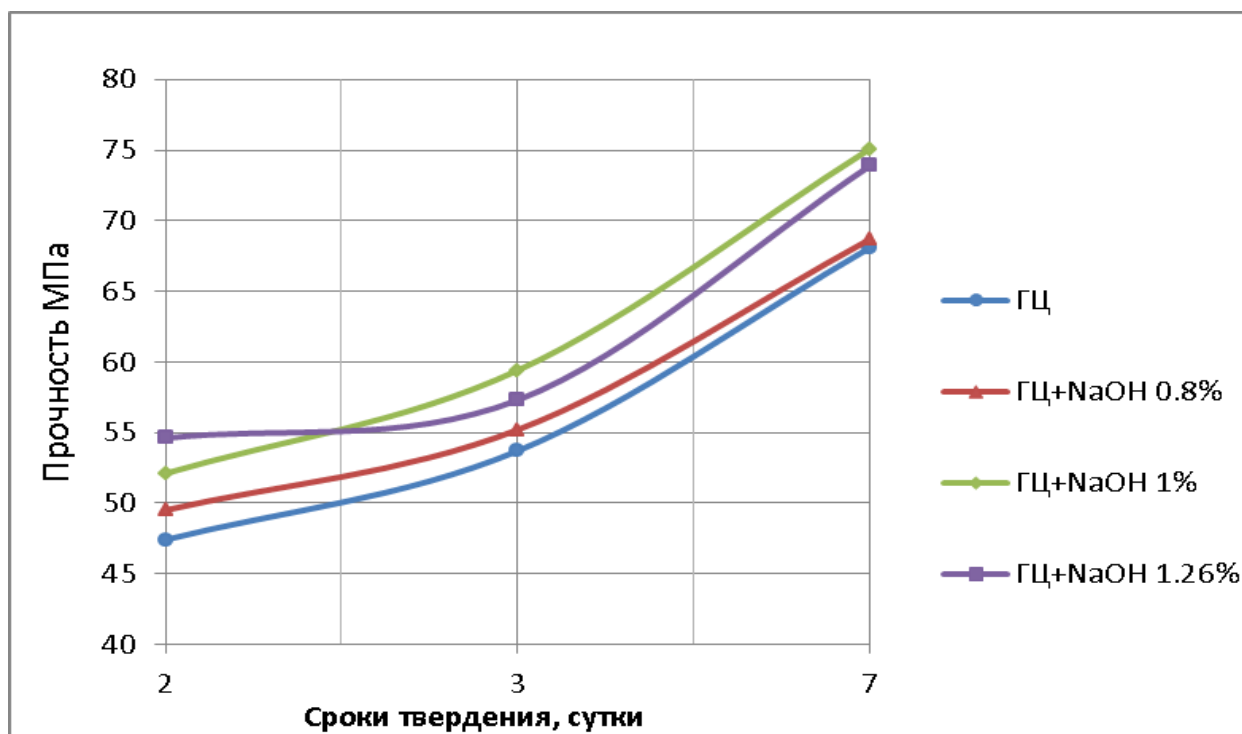


Рисунок 8 – График зависимости прочности от сроков твердения

Путем сопоставления значений прочности при сжатии и плотности газобетона, были выбраны составы с максимальной прочностью при плотностях 700 и 800 кг/м<sup>3</sup>. Оптимальные составы приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Оптимальные составы газобетона

Материал	Расход на кг/м <sup>3</sup>	
	Газобетон со средней плотностью 700 кг/м <sup>3</sup>	Газобетон со средней плотностью 800 кг/м <sup>3</sup>
ГЦ марки 50	360	412
Шамотный заполнитель	360	327
Al	2,35	2,41
NaOH	4,57	4,68
Вода	218	227

## 5.4 Изучение процессов, происходящих при твердении газобетона методами дериватографии

При твердении цементного камня в жаростойком газобетоне формируются различные соединения – алюминаты кальция и гидроксид алюминия.

Процессы твердения были исследованы с помощью дериватографии. Дериватограмма образца в 3 сут твердения приведена на рисунке.

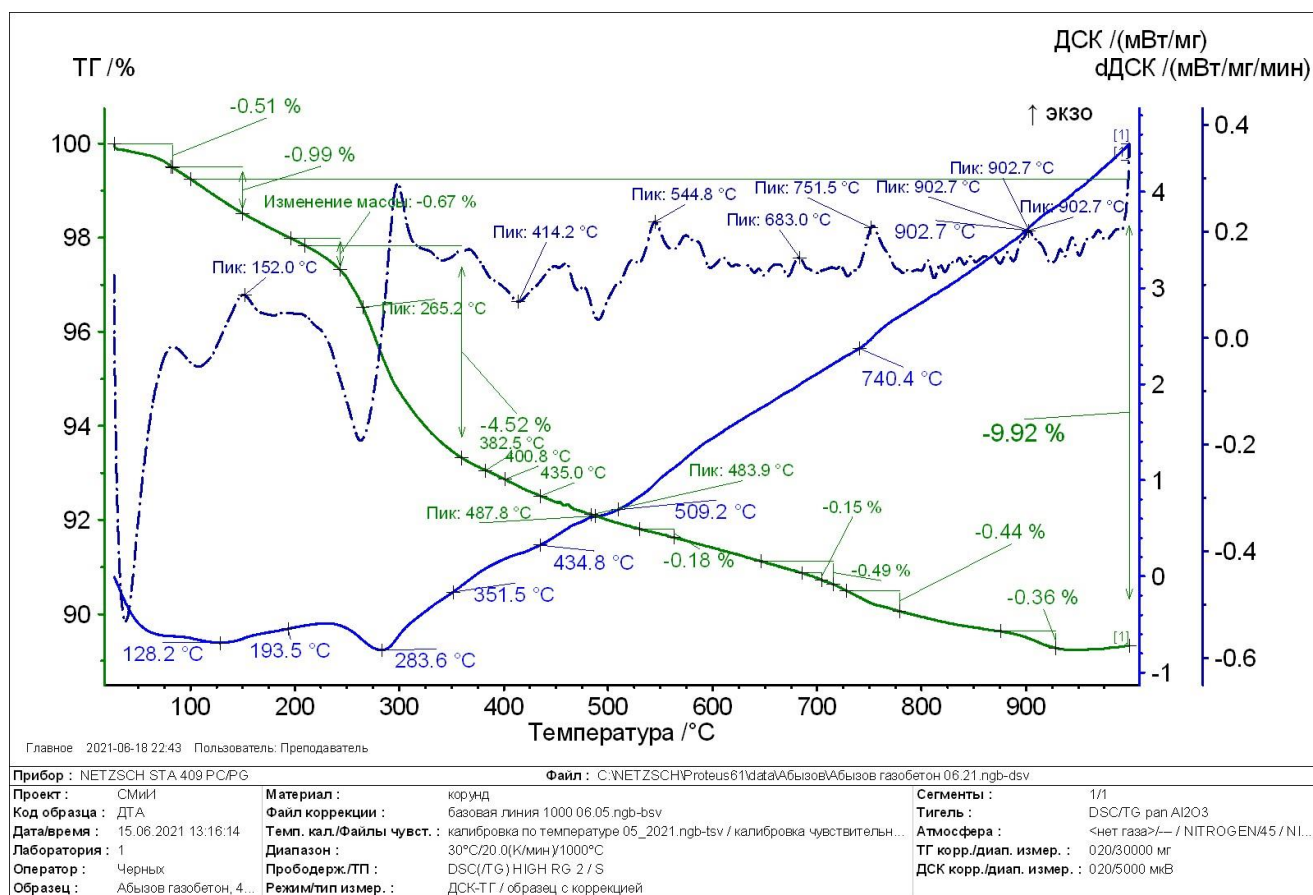


Рисунок 9 – Дериватограмма цементного камня (отбор пробы из газобетона, 3 сут твердения)

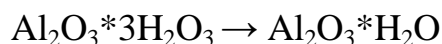
До 60 °С удаляется сорбционная вода (около 0,5% на рисунке). Первый эндоэффект – максимум при 128 °С – удаление воды из  $\text{САН}_{10}$  (около 2%). Таким образом, в 3 сут твердения в цементном камне –  $\text{САН}_{10}$  – основной гидроалюминат кальция, характерный для глиноземистого цемента в ранние сроки твердения. Удаление воды из 10-водного гидроалюмината протекает ступенчато. Второй эндоэффект – максимум при 283 °С – удаление воды из гидроалюмината кальция (вторая стадия). Примерно с 240 °С начинается удаление воды из гидраргиллита (гиббсита)  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ , которое продолжается до 300

°С. Этот эффект накладывается на удаление воды из  $САН_{10}$  – на кривой перегиб примерно при 310 °С.

Таким образом, состав продуктов твердения представлен  $САН_{10}$  и гиббситом  $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ .

После 300 °С гиббсит переходит в бемит.

Гиббсит переходит в бемит по уравнению:



Слабый эндоэффект при 340 °С – возможно, удаление воды из  $С_3АН_6$ .

Эндоэффект на участке 480-580 °С – удаление воды из бемита, присутствие бемита подтверждается.

Перелом на кривой потери массы при 500 °С – это наложение на предыдущий эффект удаления воды из низкоосновного гидросиликата  $СSH(I)$ . Удаление воды из  $СSH(I)$  идет примерно до 740 °С. Низкоосновный гидросиликат  $СSH(I)$  образуется при гидратации белита, который всегда есть в глиноземистом цементе.

Экзоэффект при 545 °С – кристаллизация обезвоженного  $СА$ .

При 680 °С – слабый эндоэффект – переход гетита  $\alpha-Fe_2O_3$  в  $\gamma-Fe_2O_3$ . Показывает, что в цементном камне был гидроксид железа (гетит), образовавшийся при гидратации алюмоферрита кальция  $С_4AF$ .

Слабый экзоэффект при 584 °С - взаимодействие щелочи с алюминатом кальция.

Экзоэффект при 750 °С – окисление ферротитана, так как в цементе присутствует небольшое количество ферротитанового шлака.

Экзоэффект при 902 °С – это известный эффект, обычно расположенный между 850 и 950 °С – кристаллизация корунда  $\alpha-Al_2O_3$  из продуктов обезвоживания бемита.

## 5.5 Исследование жаростойких свойств газобетона

Для полученных оптимальных составов жаростойкого газобетона (с плотностями 700, 800 и 900  $кг/м^3$ ) были проведены исследования жаростойких

свойств – предела прочности при обжиге при 800 °С и остаточной прочности после температуры 800 °С, усадки и термостойкости. Полученные данные показаны в таблице 4.

Таблица 4 – Жаростойкие свойства газобетона

Параметр	Средняя плотность после сушки, кг/м <sup>3</sup>		
	700	800	1000
Рсж после сушки МПа.	1,85	2,25	2,26
Рсж после обжига до 800 °С МПа.	1,48	1,73	1,88
Рсж остаточная после обжига до 800 °С, %.	80	76	83
Усадка после сушки %.	0,65	0,69	0,70
Усадка после обжига %.	0,65	0,75	0,94
Циклы термостойкости (воздушные).	5	6	10
Температура применения °С.	1200	1200	1200

Прочность после обжига (таблица 4) – уменьшается из-за процессов разложения гидроксида алюминия и алюминатов кальция. При средней плотности 700 кг/м<sup>3</sup> прочность газобетона составляет 1,48 МПа. Соответственно при плотности 800 кг/м<sup>3</sup> – прочность 1,73 и при плотности 1000 кг/м<sup>3</sup> прочность равна 1,88 МПа. Остаточная прочность газобетона после нагрева до 800 °С составляет от 76 до 83%, это больше, чем у бетона на портландцементе (около 40%). Повышение прочности может быть вызвано добавкой щелочи – ее действием на ранее начало процессов спекания. Усадка газобетона после обжига до 800 °С – небольшая, 0,6-0,9%. Термическая стойкость бетона составляет 5, и 10 воздушных теплосмен для плотности 700, 800 и 1000 соответственно. Эти показатели примерно соответствуют ближайшим аналогам (выше, чем у газобетона на портландцементе и примерно равны термостойкости газобетона на

жидком стекле). Увеличение термостойкости с повышением плотности – можно объяснить тем, что с ростом плотности растет прочность материала, а термостойкость связана с прочностью (прямо пропорционально). Характер кривых на рисунке 7 это подтверждает.

## **6 БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

Классификация опасных и вредных производственных факторов при производстве жаростойкого газобетона на глиноземистом цементе и шамоте.

Производственные факторы делятся на 2 группы: Факторы трудового процесса и факторы производственной среды. Требования выполнены в соответствии с ГОСТ 12.0.003-2015 [5].

По влиянию воздействия на человека делятся на: неблагоприятные и безвредными.

Неблагоприятные факторы это те факторы которые приводят к травмам или вредным заболеваниям. Заболевания могут переходить в хронические болезни или вызывать острые заболевания. Группа опасных факторов может привести к смертельным или не смертельным факторам.

Неблагоприятные производственные факторы непосредственно распределяются в пространственном воздухе или жидкости и имеют наличие в этих средах вредных веществ. Непосредственное влияние оказывают на организм человека вредные факторы. По происхождению могут разделяться на: природными, технико-технологическими или эргономическими.

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.

Опасные и вредные факторы за счет контакта с объектами обладающих химическими свойствами могут привести к повреждению целостности тканей, либо к сбою функционала 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. Последствием этих факторов может быть острое заболевание которое приводит к летальному исходу или инвалидности. Биологически опасные вредные факторы могут попадать организм человека через дыхательные пути, пищу, воду, через укусы животных, через слизистые оболочки или кожный покров.

Различают также психофизиологический вредный фактор к нему относят физические и нервно-психические перегрузки. Физические перегрузки могут зависеть от 2-х факторов: от рабочей позы и от массы перемещаемого груза. Нервно-психическая перегрузка появляется из-за умственного перенапряжения, перенапряжения анализаторов, монотонностью труда и эмоциональных перегрузок.

Опасные и вредные факторы при производстве ячеистых бетонов.

В своей работе проводятся исследования жаростойких ячеистых бетонов, для приготовления которых применялись такие вещества как глиноземистый цемент, шамотный заполнитель, алюминиевая пудра, едкий натр и средство для подготовки пудры алюминиевой.

В производстве ячеистых бетонов и изделий из него, могут возникнуть вредные факторы, которые сказываются на организме человека – это могут быть как физические, химические так и психофизические факторы.

К факторам физического воздействия на человека относят:

- Падение твердых сыпучих материалов на работника под действием силы тяжести при перемещении груза краном.
- Падение рабочего с высоты за счет силы тяжести.
- Повреждение работника при ударе по выступающие объекты
- Повреждения при переносе грузов краном, получаемые при соприкосновении рабочего с грузом
- Воздействие высокой температуры на организм человека при сушке или обжиге

- Воздействие большого уровня шума
- Воздействие большого содержания пылевидных частиц в воздухе, цементная пыль, шамотная пыль, алюминиевая пыль.
- Воздействие резких запахов от щелочи
- Воздействие электрического тока от оборудования на человека
- Утомляемость за счет недостаточного освещения

Химические вещества попадают в организм человека через органы дыхания и через кожный покров. По характеру воздействия являются раздражающими. Данные химические вещества относятся к группе вредных и опасных производственных факторов.

ПДК вредных химических веществ, используемых при производстве.

– Шамотная пыль в агрегативном состоянии представляет собой аэрозоль. ПДК в воздухе для шамотной пыли  $8 \text{ мг/м}^3$ . Относится к классу умеренно опасных.

– Цементная пыль имеет такие же характерные воздействия как и шамотная пыль. ПДК этой пыли в воздухе составляет  $8 \text{ мг/м}^3$ . Относится к классу умеренно опасных.

– Щелочь (едкий натр) может находиться как в состоянии аэрозоля, так и в состоянии водного раствора. ПДК для щелочи в воздухе рабочей зоны составляет  $0,5 \text{ мг/м}^3$ . Класс по опасности – высоко опасный. При производстве щелочь вводится в состав смеси, в виде водного раствора – выделения пыли нет.

– Алюминиевая пудра по воздействию на организм человека относится к умеренно опасному классу. Находится в состоянии аэрозоля. ПДК в воздухе рабочей зоны –  $2 \text{ мг/м}^3$ .

– Материал для подготовки пудры алюминиевой представляет собой обычный стиральный порошок, без каких либо добавок-ароматизаторов. В исследовании использовали 0,025% от массы замеса. Поэтому при воздействии с маленькой дозировкой он полностью безвредный.

При длительном производстве у персонала появляются физические перегрузки связанные с перемещением грузов в ручную или с наклонами тела

работника. В ходе длительных наблюдений у инженеров возникают умственные и нервно-психологические перегрузки.

В соответствии с разделом СНиП 3.09.01-85 по технике безопасности все работники, работающие с бетонной смесью должны быть оснащены очками, респираторами и плотной защитной одеждой. Рабочие, занимающиеся приготовлением суспензии водного раствора едкого натра должны работать в защитных очках и перчатках. Для более благоприятных условий работы вытяжки и устройства для отсоса пыли должны находиться вблизи оборудования.

Рабочий, отвечающий за включение и выключение работающего оборудования должен находиться в резиновых сапогах и перчатках.

Все работники предприятия должны знать инструктаж по технике безопасности и при необходимости оказать первую медицинскую помощь.

В производство газобетона используются часто применяемые, хорошо изученные материалы, которые практически полностью экологичны. При сушке и обжиге газобетон не выделяет вредных веществ.

## 7 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

В своей исследовательской работе мы разработали газобетон на основе глиноземистого цемента марки ГЦ-50. В качестве заполнителя применялся шамот в количестве 50% от массы цемента. Причем, добавка едкого натра в газобетон добавляется в количестве 0,65 % от массы цемента. Данные показатели позволяют снизить расход цемента на производство продукции, незначительно снизив прочностные показатели. Применение едкого натра в качестве газообразователя позволяет увеличить прочность и теплоизоляционные характеристики в легком жаростойком бетоне. Подобранный нами состав легкого газобетона, наиболее экономически выгодный по соотношению цена / прочность.

Стоимость изготовления продукции газобетона из цемента ГЦ-50 на 1 м<sup>3</sup> будет приведена в таблице 1.

Таблица 5 – Стоимость продукции (1 м<sup>3</sup> газобетона)

Материал	Стоимость, руб/кг	Газобетон со средней плотностью 700 кг/м <sup>3</sup>		Газобетон со средней плотностью 800 кг/м <sup>3</sup>	
		Состав 1, кг/м <sup>3</sup>	Стоимость руб	Состав 2, кг/м <sup>3</sup>	Стоимость руб
ГЦ - 50	24	360	8640	412	9888
Шамот	6	360	2160	327	1962
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	300	2,35	705	2,41	723
NaOH	45	4,57	205,6	4,68	210,6
Вода	2,9	218	632,2	227	658,3
Стоимость, руб/м <sup>3</sup>			12342,8	13441,9	

Главной задачей определения экономической эффективности является поиск похожих по характеристикам материалов и соответственно сравнение

этих материалов по стоимости на 1 м<sup>3</sup>. Хорошим конкурентом для нашего бетона будет жаростойкий бетон на глиноземистом цементе марки ГЦ-50 и заполнителе в виде вспученного вермикулита.

Была рассчитана себестоимость по статье «материалы» двух составов газобетона. Состав 1 с прочностью при сжатии 1,36 МПа, плотностью 726 кг/м<sup>3</sup>. После обжига (первого нагревания) его плотность снижается и составляет менее 700 кг/м<sup>3</sup> – таким образом, его можно сравнивать в теплоизоляционными материалами с плотностью 600 кг/м<sup>3</sup>. Состав 2 прочностью при сжатии 2,60 МПа, плотность 745 кг/м<sup>3</sup>. Данные составы бетона наиболее технологичны, имеют одни из наиболее высоких прочностных показателей. Для определения экономической эффективности для наших составов мы, сравним их с прямыми аналогами газобетона. Так как газобетон на жидком стекле промышленность не выпускает, ближайший аналог – вермикулитобетон. Для сравнения был взят состав с плотностью 700 кг/м<sup>3</sup> (таблица 6) [11].

Таблица 6 – Стоимость продукции - аналог газобетона (вермикулитобетон)

Материал	Стоимость, руб/кг	Вермикулитобетон со средней плотностью 700 кг/м <sup>3</sup>	
		Состав 1, кг/м <sup>3</sup>	Стоимость, руб
ГЦ-50	24	400	9600
Вспученный вермикулит	50	130	6500
Вода	2,9	420	1218
Стоимость руб/м <sup>3</sup>			17318

Преимущество бетона на вспученном вермикулите в более простой технологии (нет вспучивания, нет операции срезания горбушки).

Такой бетон имеет довольно схожие характеристики с полученным газобетоном. Прочность бетона от 2 до 2,5 МПа – сопоставима, плотность такого

бетона после сушки –  $700 \text{ кг/м}^3$  (для сравнения был взят состав с плотностью  $700 \text{ кг/м}^3$ ).

Плюс газобетона будет в том, что у него предельно допустимая температура применения выше на  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , чем у бетона на вермикулите, что в свою очередь, важно для жаростойких бетонов. Компоненты, используемые в наших исследованиях, полностью безвредны для окружающей среды (глиноземистый цемент, шамот). Изделия газобетона обладают абсолютной экологичностью и не выделяют в воздух вредных веществ в процессе сушки и эксплуатации. Стоимость аналога по статье расходов «материалы» на 28% больше, чем у нашего изделия. Термообработки газобетон не требует. Сроки твердения – 3 сут и у бетона на вермикулите, и у газобетона.

## 8 ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. На глиноземистом модифицированном цементе разработан жаростойкий газобетон со средней плотностью 700-800 кг/м<sup>3</sup>, прочностью при сжатии 1-3 МПа.

2. Исследованы основные жаростойкие свойства газобетона на заполнителе из шамота, установлено, что температура применения составляет не менее 1200 °С.

3. Определено, что основные свойства газобетона зависят от жидко-твердого соотношения, определяющего удобоукладываемость смеси, плотность и прочность жаростойкого бетона.

4. Исследовано влияние добавки щелочи NaOH на процессы вспучивания, плотность и прочность.

5. Установлено, что прочность газобетона определяется жидко-твердым соотношением, зависит от плотности материала.

6. Определены оптимальные составы жаростойкого газобетона, позволяющие получить материал с плотностью в диапазоне 700-800 кг/м<sup>3</sup>.

7. Термостойкостью бетона зависит от плотности и составляет 5-10 циклов (воздушных теплосмен).

8. Получены зависимости, описывающие характер связи плотности и прочности газобетона. Установлено, что прочность бетона определяется его плотностью, причем связь носит линейный характер.

9. Определены основные технико-экономические показатели газобетона, установлено, что стоимость газобетона составляет 13441,9 руб/м<sup>3</sup> бетона по статье «материалы».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Жаростойкие теплоизоляционные бетоны эффективно используются в промышленности. Одним из таких видов бетонов является газобетон. Перспективными направлениями исследований являются повышение его физико-механических и жаростойких характеристик, разработка новых теплоизоляционных материалов.

Выявлено, что добавка едкого натра в количестве около 1% от массы цемента ускоряет твердение в 1-3 сут.

В рамках данной работы проведены разработка и исследования газобетона на основе глиноземистого цемента с шамотным заполнителем. Выявлено, что для газобетона оптимальное количество едкого натра также составляет 1 % от массы цемента. Предложенное количество NaOH позволяет получить газобетон с низкой плотностью ( $600-700 \text{ кг/м}^3$ ) и прочностью до 3 МПа.

Проведены исследования влияния различных дозировок NaOH, различного соотношения цемент : шамот и Ж/Т отношения на физико-механические свойства газобетона. Выявлено, что плотность и предел прочности при сжатии газобетона связаны линейно.

Введение добавки NaOH не только улучшает вспучивание газобетона, но и позволяет без существенного увеличения себестоимости значительно повысить прочностные показатели без снижения максимальных температур эксплуатации.

Исследованы жаростойкие свойства газобетона, показано, что термостойкость газобетона составляет, в зависимости от плотности, 5-10 воздушных теплосмен. Максимальная температура применения – 1200 °С.



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 20910-2019. Бетоны жаростойкие. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2019. – 49 с.
2. ГОСТ 969-91. Цементы глиноземистые и высокоглиноземистые. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2007. – 7 с.
3. ГОСТ 5494-95 Пудра алюминиевая. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2006. – 21 с.
4. ГОСТ Р 55064-2012 Натр едкий технический. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2019. -71 с.
5. ГОСТ 12.0.003-2015 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. – М.: Стандартинформ, 2019. – 25 с.
6. ГОСТ 23037-99 Заполнители огнеупорные. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2008. – 13 с.
7. Справочное пособие к СНиП 3.09.01-85 Технология изготовления жаростойких бетонов. – М.: Стройиздат, 1991. – 90 с.
8. ГОСТ 310.3-76 Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема (с Изменением № 1). – М.: Издательство стандартов, 2003. – 10 с.
9. Некрасов, К.Д. Состояние и перспективы развития научных исследований и применений жаростойких бетонов / К.Д. Некрасов. – М.: Стройиздат, 1962.– 62с.
10. Некрасов К.Д. Тяжелый бетон при повышенных и высоких температурах / В.В. Жуков. . – М.: Стройиздат, 1962.– 45с.
11. Некрасов К.Д. Особо тяжёлые, тяжелые и облегченные жаростойкие бетоны / А.П. Тарасова. – М.: Стройиздат, 1962.– 49с.
12. Некрасов К.Д. Легкие жаростойкие бетоны / М.Г. Масленникова. – М.: Стройиздат, 1962.– 35с.

13. Alaa M. Rashad. Vermiculite as a construction material – A short guide for Civil Engineer, Construction and Building Materials / Alaa M. Rashad. – Volume 125, 2016, Pages 53-62, ISSN 0950-0618.

14. Amirmohamad Abolhasani. The fracture behavior and microstructure of calcium aluminate cement concrete with various water-cement ratios / Amirmohamad Abolhasani, Hadi Nazarpour, Mehdi Dehestani – Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Volume 109, 2020, 102690, ISSN 0167-8442.

15. Lightweight design of bauxite-SiC composite refractories as the lining of rotary cement kiln using alternative fuels, Ceramics International / Bo Ren, Yawei Li, Shaobai Sang, Shengli Jin. – Volume 172, 2018, Pages 2683-2694, ISSN 0959-6526.

16. Cong Ma. Experimental study on the preparation and properties of a novel foamed concrete based on magnesium phosphate cement, Construction and Building Materials Cong Ma, Bing Chen. – Volume 137, 2017, Pages 160-168, ISSN 0950-0618.

17. The impact of bonite aggregate on the properties of lightweight cement-bonded bonite–alumina–spinel refractory castables. / Guangping Liu, Xuejun Jin, Wendong Qiu, Guozhi Ruan, Yuanyuan Li. – Ceramics International: 2016, Volume 42, Issue 4, ISSN 0272-8842, Pages 4941-4951.

18. Direct foaming of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based macroporous ceramics containing pre-foamed colloidal alumina, calcite and CAC suspension / I.C. Finhana, O.H. Borges, T. Santos, V.R. Salvini, V.C. Pandolfelli – Ceramics International: 2021, ISSN 0272-8842.

19. Direct foaming of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based macroporous ceramics containing pre-foamed colloidal alumina, calcite and CAC suspension / I.C. Finhana, O.H. Borges, T. Santos, V.R. Salvini, V.C. Pandolfelli. – Ceramics International: 2021, ISSN 0272-8842.

20. Environmental impacts and mechanical properties of lightweight concrete containing bauxite residue (red mud), Journal of Cleaner Production / I.M. Nikbin, M. Aliaghazadeh, Sh Charkhtab, A. Fathollahpour. – Volume 172, 2018, Pages 2683-2694, ISSN 0959-6526.

21. John Newman. *Advanced Concrete Technology*. / John Newman, Ban Seng Choo. – Butterworth-Heinemann: 2003, ISBN 9780750656863, Pages 1-13.
22. Study on microstructure and bond strength of interfacial transition zone between cement paste and high-performance lightweight aggregates prepared from ferrochromium slag. / Lihua Zhang, Yunsheng Zhang, Chuanbei Liu, Laibao Liu, Kaijing Tang, *Construction and Building Materials*. – Volume 142, 2017, Pages 31-41, ISSN 0950-0618.
23. Murat Dener. High temperature resistance of self compacting alkali activated slagportland cement composite using lightweight aggregate, *Construction and Building Materials* / Murat Dener, Mehmet Karatas, Mehrzad Mohabbi. – Volume 290, 2021, 123250.
24. Characteristics of castables incorporating highly porous alumina aggregates fabricated by high-temperature evaporation method / Muto Daimu, Shinobu Hashimoto, Yusuke Daiko, Sawao Honda, Yuji Iwamoto. – *Ceramics International*, Volume 45, Issue 10, 2019, Pages 13509-13517, ISSN 0272-8842.
25. Paweł Ogrodnik. The impact of aeration of concrete based on ceramic aggregate, exposed to high temperatures, on its strength parameters. / Paweł Ogrodnik, Jacek Szulej, *Construction and Building Materials*. – Volume 157, 2017, Pages 909-916, ISSN 0950-0618.
26. Ron Montgomery. 4 - Heat-resisting and refractory concretes / Ron Montgomery – *Ceramics International*: Volume 47, Issue 7, Part A, 2021, Pages 9234-9244, ISSN 0272-8842.
27. Seyed Esmaeil Mohammadyan-Yasouj. Influence of waste alumina powder on self-compacting concrete resistance under elevated temperature / Seyed Esmaeil Mohammadyan-Yasouj, Nastaran Heidari, Hoofar Shokravi. – *Journal of Building Engineering*: Volume 41, 2021, 102360, ISSN 2352-7102.
28. Sk S. Hossain. Preparation of multi-layered (dense-porous) lightweight magnesium-aluminum spinel refractory / Sk S. Hossain, P.K. Roy. – *Ceramics International*: Volume 47, Issue 9, 2021, Pages 13216-13220.

29. V.A. Abyzov. Refractory Cellular Concrete Based on Phosphate Binder from Waste of Production and Recycling of Aluminum. / V.A. Abyzov. – Procedia Engineering: Volume 206, 2017, Pages 783-789, ISSN 1877-7058.

30. Wangding, Peng Advanced lightweight periclase-magnesium aluminate spinel refractories with high mechanical properties and high corrosion resistance / Wangding Peng, Zhe Chen, Wen Yan, Stefan Schafföner, Guangqiang Li, Yawei Li, Cangjian Jia // Construction and Building Materials. – 2021, Volume 291, 123388.

31. Synthesis mechanism and properties of lightweight mullite-corundum refractories obtained through high temperature liquid-assisted micrometer-scale Kirkendall effect. / Yuchi Liu, Hongfeng Yin, Yun Tang, Yalou Xin, Hudie Yuan, Xiaohu Ren, Qifa Wan. – Ceramics International: Volume 47, Issue 7, Part A, 2021, Pages 9234-9244, ISSN 0272-8842.