

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

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

/А.А. Орлов/

«    » 2020 г.

**Пояснительная записка к выпускной квалификационной работе**

**08.03.01.2020.286.00.00.ПЗ**

**Исследование процессов твердения цементов ЦЕМ I и ЦЕМ II**

Руководитель ВКР

/Т.Н. Черных/

«    » 2020 г.

Автор ВКР

Студент группы АС – 461

/Хань Юй /

«    » 2020 г.

Нормоконтролёр

/Т.Н. Черных/

«    » 2020 г.

Челябинск  
2020

## АННОТАЦИЯ

Хань Юй. Исследование процессов твердения цементов ЦЕМ I и ЦЕМ II – Челябинск: ЮУрГУ, Стр.мат., 2020, 22 ил., 4 табл., 65 с.

Библиографический список – 8 наименований.

В дипломной работе представлено исследование процессов твердения цементов ЦЕМ I и ЦЕМ II. В работе представлен литературный обзор проблемы, проведены эксперименты, целью которых было выяснить влияние состава цементов ЦЕМ I и ЦЕМ II на свойства и процессы, происходящие при твердении. Проведено исследование нормальной густоты, сроков схватывания, прочности образцов цементов, проведены термический анализ (дериватография), рентгенофазовый анализ и микрокалориметрия.

					<i>08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ</i>			
<i>Изм</i>	<i>Дата</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>	Хань Юй				<i>Исследование процессов твердения цементов ЦЕМ I и ЦЕМ II</i>	<i>Литера</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Проверил</i>	Черных Т.Н.					ПЗ	4	54
<i>Н. контр.</i>	Черных Т.Н.					<i>Южно-Уральский государственный университет Кафедра «Строительные материалы и изделия»</i>		

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	6
1.1 Процессы твердения портландцементного клинкера.....	6
1.2 Процессы твердения портландцементного клинкера в присутствии гидравлических добавок .....	29
2 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	34
2.1 Определение нормальной плотности и подготовка образцов .....	34
2.2 Подготовка образцов.....	38
2.3 Сроки схватывания .....	39
2.4 Определение тонкости помола по остатку на сите .....	40
2.5 Прочность при сжатии и изгибе .....	41
2.6 Дифференциально-термический анализ .....	44
2.7 Рентгенофазовый анализ.....	45
2.8 Микрокалориметрический анализ.....	46
3 РАСШИФРОВКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	49
3.1. Физико-механические характеристики .....	50
3.1.1 Сроки схватывания.....	50
3.1.2 Тонкость помола.....	50
3.1.3 Прочность при сжатии .....	50
3.1 Микрокалориметрический анализ.....	51
3.2 Термический анализ (дериватография).....	55
3.3 Рентгенофазовый анализ.....	56
4 ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТВЕРДЕНИЯ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ТВЕРДЕНИЯ ЦЕМ I и ЦЕМ II .....	61
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	64
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	65

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		4

## ВВЕДЕНИЕ

Вяжущие вещества – основа современного строительства. Их широко применяют для изготовления штукатурных и кладочных растворов, а также для разнообразных бетонов.

Существует значительное количество разнообразных вяжущих, однако в строительстве применяется лишь часть из них. Их называют строительными вяжущими веществами и делят на две основные группы:

- 1) неорганические (минеральные) вяжущие вещества;
- 2) органические вяжущие вещества, из которых больше всего используют продукты перегонки нефти и каменного угля (битумы и дегти), называемые часто «черными» вяжущими.

Строительными минеральными вяжущими веществами называют порошковидные материалы, которые после смешения с водой (а в отдельных случаях с растворами некоторых солей) образуют массу, постепенно затвердевающую и переходящую в камневидное состояние.

Почти все минеральные вяжущие вещества получают путем грубого и тонкого измельчения исходных материалов и полупродуктов с последующей термической обработкой при разных температурах. В этих условиях протекают разнообразные физико-химические процессы, обеспечивающие получение продукта с требуемыми свойствами.

Большинство минеральных вяжущих твердеет в результате возникновения гидратных новообразований при взаимодействии вяжущего вещества с водой.

Производство вяжущих веществ представляет собой комплекс химических и физико-механических воздействий на исходные материалы, осуществляемых в требуемой последовательности

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		5

# 1 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

## 1.1 Процессы твердения портландцементного клинкера

Портландцемент является важнейшим вяжущим веществом.

Изобретение портландцемента связано с именами Егора Герасимовича Челиева – начальника мастерских военно-рабочей бригады и Джозефа Аспдина – каменщика из английского города Лидса.

Портландцемент – гидравлическое вяжущее вещество, твердеющее в воде и на воздухе. Его получают тонким измельчением обожженной до спекания сырьевой смеси известняка и глины, обеспечивающей преобладание в клинкере силикатов кальция. Спекшаяся сырьевая смесь в виде зерен размером до 40 мм называется клинкером; от качества его зависят важнейшие свойства цемента: прочность и скорость ее нарастания, долговечность, стойкость в различных эксплуатационных условиях.

Процесс твердения портландцемента можно разделить на три этапа.

Первая стадия - фаза растворения, когда цементные минералы растворяются в воде, и их химическое взаимодействие происходит с образованием гидратированных соединений, которые образуются в растворе до тех пор, пока не образуется насыщенный раствор. Образование гидратов может происходить также топологически, т.е. путем прямого присоединения молекул воды.

Вторая стадия - период коллоидизации или коагуляции, когда опухоли, возникающие в результате постоянного взаимодействия с водой, не могут быть растворены в уже насыщенном растворе, а отделяются в гелеобразной форме.

Третья стадия - период кристаллизации или закалки, который сопровождается увеличением интенсивности, когда гелеобразные опухоли сливаются в кристаллы и становятся кристаллическими симбионтами (рисунок 1).

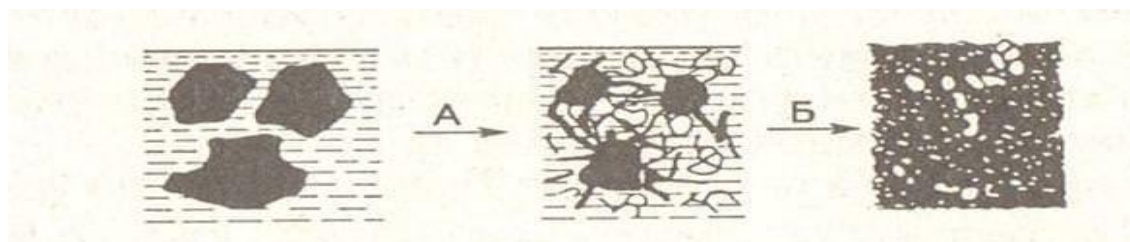


Рисунок 1 – Схема формирования структуры цементного камня

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		6

После смешивания цемента с водой сразу же начинается химическая реакция. При взаимодействии силиката кальция с водой в результате реакции образуются два новых соединения: дикальций гидросиликат и гидроксид кальция



Следует подчеркнуть это.

-Взаимодействие с водой  $\text{C}_3\text{S}$  и  $\text{C}_2\text{S}$  осуществляется по-разному.

Скорость:  $\text{C}_3\text{S}$  намного активнее, чем  $\text{C}_2\text{S}$ , что определяет увеличение прочности цемента в начале затвердевания.

-Силикат кальция высвобождается при взаимодействии с водой.

Для регулирования сроков схватывания в обычных цементах марок 300...500 при помоле к клинкеру добавляют гипс не менее 1,0 % и не более 3,5 % от массы цемента в пересчете на ангидрид серной кислоты  $\text{SO}_3$ , а в цементах высокомарочных и быстротвердеющих – не менее 1,5 % и не более 4,0 %. Портландцемент выпускают без добавок или с активными минеральными добавками.

ГОСТ предусматривает выпуск:

- ЦЕМ I - портландцемент;
- ЦЕМ II - портландцемент с минеральными добавками;
- ЦЕМ III - шлакопортландцемент;
- ЦЕМ IV - пуццолановый цемент;
- ЦЕМ V - композиционный цемент.

Клинкер. Качество клинкера зависит от его химического и минералогических составов. Для производства портландцементного клинкера применяют известняк и глину. Известняк в основном состоит из двух оксидов:  $\text{CaO}$  и  $\text{CO}_2$ , а глина – из различных минералов. В процессе обжига сырьевой смеси удаляется  $\text{CO}_2$ , а оставшиеся четыре оксида образуют клинкерные минералы. Содержание оксидов в цементе примерно следующее: 64...67 %  $\text{CaO}$ , 21...24 %  $\text{SiO}_2$ , 4...8 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 2...4 %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7

Кроме указанных основных оксидов в портландцементном клинкере могут присутствовать MgO и щелочные оксиды, снижающие качество цемента. Оксид магния, обожженный при температуре около 1500 °С, при взаимодействии с водой очень медленно гасится и вызывает появление трещин в уже затвердевшем растворе или бетоне, поэтому содержание оксида магния в портландцементе не должно быть более 5 %. Наличие в цементе щелочных оксидов выше 1 % может вызвать разрушение отвердевшего бетона на таком цементе.

Указанные выше основные оксиды находятся в клинкере не в свободном виде, а образуют при обжиге четыре основных минерала, относительное содержание которых в портландцементе следующее (%): трехкальциевый силикат (алит) – 45...60; двухкальциевый силикат (белит) – 20...35; трехкальциевый алюминат – 4...12; четырехкальциевый алюмоферрит – 10...18.

Алит – основной минерал клинкера, быстро твердеет и практически определяет скорость твердения и нарастания прочности портландцемента. Он представляет собой твердый раствор трехкальциевого силиката и небольшого количества (2...4 %) других примесей, которые могут существенно влиять на структуру и свойства портландцемента.

Белит – второй по важности и содержанию силикатный минерал клинкера, медленно твердеет и достигает высокой прочности при длительном твердении. Белит в клинкере представляет собой твердый раствор двухкальциевого силиката и небольшого количества (1...3 %) др. примесей. В связи с тем, что белит при медленном охлаждении клинкера теряет вяжущие свойства, это явление предотвращается быстрым охлаждением клинкера.

Содержание минералов-силикатов в клинкере в сумме составляет около 75 %, поэтому гидратация алита и белита в основном определяет свойства портландцемента. Оставшиеся 25 % объема клинкера между кристаллами алита и белита заполнены кристаллами C3A, C4AF, стекла и второстепенными минералами.

Трехкальциевый алюминат при благоприятных условиях обжига образуется в виде кубических кристаллов. Он очень быстро гидратирует и твердеет.

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		8

Продукты гидратации имеют пористую структуру и низкую прочность. Кроме того, он является причиной сульфатной коррозии цемента, поэтому его содержание в сульфатостойком цементе ограничено 5 %.

Четырехкальциевый алюмоферрит ( $C_4AF$ ) – алюмоферритная фаза промежуточного вещества клинкера, представляет собой твердый раствор алюмоферритов кальция разного состава. По скорости гидратации этот минерал занимает как бы промежуточное положение между алитом и белитом и не оказывает определяющего значения на скорость твердения и тепловыделение портландцемента.

Клинкерное стекло присутствует в промежуточном веществе в количестве 5... 15%, которое в основном состоит из  $CaO$ ,  $Al_2O_3$ ,  $MgO$ ,  $K_2O$  и  $Na_2O$ .

При правильно рассчитанной и тщательно подготовленной и обожженной сырьевой смеси клинкер не должен содержать свободного оксида кальция  $CaO$ , так как пережженная при температуре около  $1500\text{ }^\circ\text{C}$  известь, так же как и магnezия  $MgO$ , очень медленно гасится, увеличиваясь в объеме, что может привести к растрескиванию уже затвердевшего бетона.

Портландцемент, получаемый на заводах из различных видов природного сырья и с неодинаковой технологией производства, отличается как по химико-минералогическому составу, так и по свойствам. Требования стандарта не отражают полностью некоторых важных для строительства свойств цемента: стойкости цементного камня в агрессивных средах, морозостойкости, интенсивности тепловыделения, деформативной способности и т. Д. Однако в этом значительную помощь оказывает знание минералогического состава клинкера, который имеет прямую связь с основными физико-механическими свойствами портландцемента и позволяет проектировать портландцемент для бетона конкретных эксплуатационных условий.

Производство портландцемента. Сырье для производства портландцемента должно содержать 75...78 %  $CaCO_3$  и 22...25 % глинистого вещества. Горные породы, удовлетворяющие указанным требованиям, в природе встречаются редко. Поэтому для производства портландцемента наряду с известняком и глиной

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		9



следует применять так называемые корректирующие добавки, содержащие значительное количество одного из оксидов, недостающих в сырьевой смеси. Так, недостаточное количество компенсируется введением высококремнеземистых веществ (опоки, диатомита, трепела). Увеличить содержание оксидов железа можно путем введения колчеданных огарков или руды. Повышение содержания глинозема достигается добавлением высокоглиноземистых глин.

Кроме того, цементная промышленность все шире начинает использовать побочные продукты, например, отходы разных отраслей промышленности – доменные шлаки, нефелиновый шлам (отход при производстве глинозема) и др. В них содержится 25-30 %  $\text{SiO}_2$ ; 50...58 %  $\text{CaO}$ ; 2...5 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 3...8 % других оксидов. Если к сырью такого состава добавить 15...20 % известняка, то состав смеси получается аналогичный используемому для получения портландцемента.

Использование в цементной промышленности побочных продуктов и отходов других отраслей – крупный шаг в разработке безотходной технологии, способствующей охране окружающей среды. В качестве топлива применяют природный газ, сокращается использование каменного угля и мазута. В настоящее время отечественная цементная промышленность в значительной мере работает на газообразном топливе, как наиболее эффективном. Технологический процесс производства портландцемента состоит из следующих основных операций: добычи известняка и глины, подготовки сырьевых материалов и корректирующих добавок, приготовления из них однородной смеси заданного состава, обжига смеси и измельчения клинкера в тонкий порошок совместно с гипсом, а иногда с добавками.

В зависимости от приготовления сырьевой смеси различают два основных способа производства портландцемента: мокрый и сухой. При мокром способе сырьевые материалы измельчают и смешивают в присутствии воды и смесь в виде жидкого шлама обжигают во вращающихся печах; при сухом способе материалы измельчают, смешивают и обжигают в сухом виде. В последнее время все шире начинает применяться комбинированный способ приготовления сырьевой смеси, по которому сырьевую смесь готовят по мокрому способу, затем шлам

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		10

обезвоживают и из него готовят гранулы, которые обжигают по сухому способу.

Каждый из способов имеет свои положительные и отрицательные стороны. В водной среде облегчается измельчение материалов и быстро достигается однородность смеси, но расход топлива на обжиг смеси в 1,5...2 раза больше, чем при сухом способе. Развитие сухого способа длительное время ограничивалось вследствие низкого качества получаемого клинкера. Однако успехи в технике помола и гомогенизации сухих смесей обеспечили качество портландцемента.

В настоящее время получает всемерное развитие сухой способ производства цемента с печами, оборудованными циклонными теплообменниками и реакторами-декарбонизаторами. Производительность технологической линии с печью 4,5 на 80 м циклонными теплообменниками и реактором-декарбонизатором составляет 3000 т клинкера в сутки. При этом способе производства цемента расход топлива снижается на 30...40 % по сравнению с мокрым, а металлоемкость печных агрегатов – в 2,5...3 раза.

Намечается также освоение технологии и строительство цементных заводов с реактором-декарбонизатором с печами 5 на 100 м производительностью 5000 т клинкера в сутки. По мокрому способу сырьевые материалы, доставляемые из карьера на завод в кусках, подвергают предварительному измельчению (до крупности не более 5 мм). Твердые породы дробят в дробилках, а более мягкие (глина, мел) измельчают перемешиванием с водой в глиниболтушках. Болтушка представляет собой круглый железобетонный резервуар диаметром 5...10 м и высотой 2,5...3,5 м, футерованный чугунными плитами. Вокруг вертикальной оси в болтушке вращается крестовина с подвешенными в ней на цепях стальными граблями для измельчения кусков глины. Полученный в глиноболтушке шлам с влажностью около 45 % выпускается через отверстие с сеткой и переучивается в трубную (шаровую) мельницу, куда непрерывно подается дробленый известняк. Трубная мельница представляет собой стальной цилиндр длиной до 15 м, диаметром 3,2 м, вращающийся на полых цапфах, через которые мельницу с одной стороны загружают, а с другой стороны – разгружают. Внутри мельница

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		11

разделена перегородками с отверстиями на три камеры. В первой и второй камерах имеются стальные или чугунные шары, а в третьей – небольшие цилиндрики. Через полулю цапфу шлам поступает в первую камеру трубной мельницы. При вращении мельницы шары под действием центробежной силы и силы трения прижимаются к стенкам, поднимаются на некоторую высоту и падают, разбивая и растирая зерна материала. Трубные мельницы являются непрерывно действующим оборудованием. Тонкоизмельченный материал в виде сметанообразной массы – шлама – подается насосом в шлам-бассейны, представляющие собой железобетонные или стальные резервуары цилиндрической формы. В них окончательно корректируется химический состав шлама и создается некоторый запас для бесперебойной работы печей. Из бассейнов шлам поступает в баки, а затем равномерно подается во вращающуюся печь для обжига. Вращающаяся печь представляет собой длинный цилиндр из листовой стали, облицованный внутри огнеупорным материалом. Длина печей 150...185...230 м, диаметр 4...5...7 м. Барабан печи установлен с наклоном 3,5...4° и вращается вокруг своей оси с частотой 0,5...1,4 мин. Вращающиеся печи работают по принципу противотока. Шлам загружается с верхней стороны печи и передвигается к нижнему концу.

Топливо в виде газа или пыли каменного угля вдувается вместе с воздухом с противоположного конца печи и сгорает, создавая температуру 1500 °С. Дымовые газы удаляются со стороны поднятого конца печи. Шлам, перемещаясь вдоль барабана, соприкасается с горячими газами, идущими ему навстречу, и постепенно нагревается.

Образованию портландцементного клинкера предшествует ряд физико-химических процессов, протекающих в определенных температурных границах – технологических зонах печного агрегата – вращающейся печи. При мокром способе производства цемента по ходу движения обжигаемого материала условно выделяют следующие зоны: I – испарения, II – подогрева и дегидратации, III – декарбонизации, IV – экзотермических реакций, V – спекания, VI – охлаждения.

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		12

Рассмотрим эти процессы, начиная с поступления сырьевой смеси в печь, т.е. по направлению с верхнего ее конца (холодного) к нижнему (горячему). В зоне испарения при постепенном повышении температуры с 70 до 200 °С испаряется влага; сырьевая смесь подсушивается. Подсушенный материал комкуется. Перемещаясь, комья распадаются на более мелкие гранулы. В печах сухого способа зона испарения отсутствует.

В зоне подогрева при постепенном нагревании сырья с 200 до 700 °С выгорают органические примеси, из глиняных минералов удаляется кристаллохимическая вода (при 450...500 °С) и образуется безводный каолинит  $Al_2[Si_2O_5](OH)_4$ . Зоны испарения и подогрева при мокром способе занимают 50...60 % длины печи. В зоне декарбонизации температура обжигаемого материала повышается с 700 до 1100 °С; происходит диссоциация карбонатов кальция и магния с образованием свободных CaO и MgO. Одновременно продолжается распад глинистых минералов на оксиды  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ , которые вступают в химическое взаимодействие с CaO. В результате этих реакций, происходящих в твердом состоянии, образуются минералы  $3CaO-Al_2O_3$ ,  $CaO-Al_2O_3$  и частично  $2CaO-SiO_2$ .

В зоне экзотермических реакций при температуре 1200...1300 °С завершается процесс твердофазового спекания материала, образуются  $3CaO-Al_2O_3$ ,  $4CaO-Al_2O_3-Fe_2O_3$  и белит, резко уменьшается количество свободной извести, но достаточное для насыщения двухкальциевого силиката до трехкальциевого.

В зоне спекания при температурах 1300...1450...1300 °С происходит частичное плавление материала (20...30 % обжигаемой смеси). В расплав переходят все клинкерные минералы, кроме  $2CaO-SiO_2$ , все легкоплавкие примеси сырьевой смеси. Алит кристаллизуется из расплава в результате растворения в нем оксида кальция и двухкальциевого силиката. Это соединение плохо растворимо в расплаве, вследствие чего выделяется в виде мелких кристаллов, которые в дальнейшем растут. Понижение температуры с 1450 до 1300 °С вызывает кристаллизацию из расплава (в виде периклаза), которая заканчивается в зоне охлаждения.

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		13

В зоне охлаждения температура клинкера понижается с 1300 до 1000 °С, здесь полностью формируются его структура и состав, включающий алит  $C_3S$ , белит  $C_2S$ ,  $C_3A$ ,  $C_4AF$ ,  $MgO$  (периклаз), стекловидную фазу и второстепенные составляющие. Границы зон во вращающейся печи достаточно условны и не являются стабильными. Меняя режим работы печи, можно смещать зоны и регулировать тем самым процесс обжига.

Образовавшийся таким образом раскаленный клинкер поступает в холодильник, где резко охлаждается движущимся навстречу ему холодным воздухом. Клинкер, выходящий из холодильника вращающихся печей с температурой около 100 °С и более, поступает на склад для окончательного охлаждения и вылеживания, где он находится до 15 дней. Если известь содержится в клинкере в свободном виде, то в течение вылеживания она гасится влагой воздуха. На высокомеханизированных заводах с четко организованным технологическим процессом качество клинкера оказывается настолько высоким, что отпадает необходимость его вылеживания.

Помол клинкера совместно с добавками производят в трубных многокамерных мельницах.

Тонкое измельчение клинкера с гипсом и активными минеральными добавками в тонкий порошок производится преимущественно в сепараторных установках, работающих по открытому или замкнутому циклу.

Эффективная работа трубной мельницы обеспечивается охлаждением мельничного пространства путем его аспирации (вентиляции). Благодаря аспирации производительность мельниц растет на 20...25 %, уменьшается пылевыведение, улучшаются условия труда. Для интенсификации помола вводят добавку – сульфитно-дрожжевую бражку (СДБ), при этом производительность мельниц увеличивается на 20...30%.

На современных цементных заводах помол портландцемента в открытом цикле проходит по следующей технологической схеме. Клинкер, гипс и активные минеральные добавки со склада подаются в бункера и дозируются тарельчатыми питателями. После измельчения цемент поступает через цапфу мельницы в

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		14

аспирационную шахту, а из нее в бункер цемента и далее на склад. Мельничное пространство аспирируется, запыленный воздух частично очищается в аспирационной шахте, а затем в циклонах и электрофилтре, далее собирается шнеком и направляется в расходный бункер цемента. Недостатком помола в открытом цикле является трудность получения цемента с высокой удельной поверхностью (до 400...500 м<sup>2</sup>/кг).

Мельницы, работающие в замкнутом цикле, дают более однородный по размеру зерен продукт большей удельной поверхности (4000...5000 см<sup>2</sup>/г); замкнутый цикл помола включает помольный агрегат и центробежный сепаратор, определяющий крупные зерна, возвращаемые на домол в первую камеру, а тонкая фракция домалывается в третьей камере, из которой выгружается готовый цемент. В полностью замкнутом цикле материал проходит через сепаратор дважды.

В последнее время получает распространение короткая трубная мельница, обычно двухкамерная, работающая в замкнутом цикле с сепаратором.

Готовый портландцемент (с температурой 100 °С и более) пневматическим транспортом направляется в силосы для охлаждения. После этого его расфасовывают по 50 кг в многослойные бумажные мешки или загружают в специально оборудованный автомобильный, железнодорожный или водный транспорт.

Производство цемента по сухому способу экономичнее, чем по мокрому: отсутствует процесс образования шлама; можно совместить отдельные звенья технологической схемы в одном агрегате – мельницы самоизмельчения «Аэрофол», усреднительные склады, мельницы помола сырьевых материалов с подсушкой и др.

При сухом способе поступающие на завод сырьевые материалы в виде мергеля, известняка и глины подвергают дроблению в дробилках типа С-776 до зерен крупностью 2,5 мм (глинистый материал дробят в агрегатах с одновременной его сушкой). Приготовленный дробленый сырьевой материал ленточными транспортерами подают на склад сырья, где сырьевые компоненты усредняют (с помощью усреднительных машин) до установленного норматива по

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		15

химическому составу и подают далее в бункера мельниц. Из последних сырьевые компоненты вместе с добавками через дозаторы по массе поступают в приемные устройства помольных агрегатов, где их измельчают до требуемой тонины, подсушивают за счет тепла отходящих газов из вращающихся печей и подвергают сепарации.

Измельченный в мельнице материал выгружают потоком газов через циклоны-разгрузатели с помощью мельничного вентилятора. Далее мука поступает в коррекционные силосы, где она гомогенизируется и перегружается в расходные силосы. Из силосов сырьевую смесь подают пневмоподъемниками в загрузочное устройство, оснащенное дозаторами по массе, и далее в циклонные теплообменники вращающейся печи.

Обжиг клинкера при сухом способе производства осуществляется во вращающихся печах с циклонными теплообменниками, состоящими обычно из четырех последовательно соединенных циклонов, через которые направляются отходящие из печи газы; навстречу газам сверху вниз через циклоны поступает сухая измельченная сырьевая шихта; за 25...30 с она нагревается до 750...800°C и декарбонизируется на 30...40 %. Такая современная печь имеет производительность 3000 т/с при удельном расходе тепла 3,2...3,4 МДж/кг клинкера.

Техническим прогрессом является введение в систему циклонных теплообменников дополнительной диссоциационной ступени реактора-декарбонизатора, в котором сжигается до 60% топлива, предназначенного для обжига клинкера. В реакторе-декарбонизаторе происходит на 85...90% разложение карбоната кальция, а остальные 10...15% процесса диссоциации приходятся на долю вращающейся печи. Установка декарбонизатора позволяет повысить съём клинкера с 1 м<sup>3</sup> внутреннего объема печи в 2,5...3 раза, повысить производительность печей до 6000... 10000 т/сут, снизить удельный расход теплоты до 3,0...3,1 МДж/кг клинкера. Размеры установки невелики, и она может использоваться не только при строительстве новых заводов, но и при модернизации действующих печей с циклонными теплообменниками. Таким образом, наиболее теплонапряженная стадия процесса обжига цементного

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		16

клинкера – декарбонизация – выносится за пределы печи, в которой происходит только спекание клинкера, и она оказывается термически ненагруженной. Это дает возможность существенно повысить производительность печей при том же удельном расходе тепла на обжиг. Клинкер охлаждается до 60...80 °С в колосниковом холодильнике и далее подается на измельчение в сепараторную мельницу. Цемент транспортируют в силосы, из которых он идет на отгрузку навалом или через упаковочную машину в таре потребителю.

Известны вращающиеся печи полусухого способа производства, в них печь соединена с конвейерной решеткой, на которой через слой гранулированной сырьевой шихты дважды просасываются горячие печные газы; в результате в загрузочный конец печи поступает подогретая и частично декарбонизированная сырьевая шихта. Расход тепла в этой печи размерами 4х60 м – около 3,5 МДж при производительности 42 т/ч.

При комбинированном способе сырьевые материалы, подготовленные по мокрому способу, и шлам, имеющий влажность около 40 %, обезвоживаются на фильтрах до влажности 16...18 %. Из полученного «сухаря» готовят гранулы и обжигают их по схеме сухого способа.

Алинит – это высокоосновный силикат кальция, содержащий около 2,5 % хлорида. Клинкер, синтезированный в солевом расплаве, размалывается в 3...4 раза легче, чем обычный. Это позволяет снизить электротраты на помол и увеличить производительность цементных мельниц. При этом сокращается число помольных агрегатов. Алинитовый цемент быстрее гидратируется в начальные сроки. Технология нового цемента осваивается на цементных заводах. Сейчас глубоко изучаются коррозионная стойкость бетона на этом цементе и поведение стальной арматуры в бетоне с учетом наличия в нем хлора. Все это позволит определить рациональные области применения алинитового цемента.

Общий расход энергии на 1 т цемента 325...550 МДж, причем минимальные энергетические затраты достигаются при сухом способе с применением декарбонизатора: на помол клинкера с добавками затрачивается 125...180 МДж.

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		17



Твердение портландцемента – при затворении портландцемента водой образуется пластичное клейкое цементное тесто, постепенно густеющее и переходящее в камневидное состояние.

При твердении портландцемента происходит ряд весьма сложных химических и физических явлений. Каждый из минералов при затворении водой реагирует с ней и дает различные новообразования. Все процессы взаимодействия отдельных клинкерных минералов с водой протекают одновременно, налагаются один на другой и влияют друг на друга. Получившиеся новообразования могут в свою очередь взаимодействовать как между собой, так и с исходными клинкерными минералами и давать новые соединения. Все это создает трудности при изучении твердения портландцемента. Типичными реакциями для твердения портландцемента и других вяжущих веществ являются реакции гидратации, протекающие с присоединением воды. Они могут идти без распада основного вещества или сопровождаться его распадом (реакции гидролиза).

Процесс твердения портландцемента в основном определяется гидратацией силикатов, алюминатов и алюмоферритов кальция. Взаимодействие  $C_3S$  с водой при комнатной температуре происходит при полной гидратации.

Поскольку жидкая фаза твердеющей системы быстро и полностью насыщается оксидом кальция, полагают, что вначале образуется гидросиликат кальция  $C_2SH_2$ , который по мере выделения извести в твердую фазу переходит в  $CSH(B)$ . Этому способствует также переход в раствор щелочей, снижающих в нем концентрацию извести. Низкоосновные гидросиликаты кальция относятся к серии  $CSH(B)$ . По структуре они близки к природному минералу тобермориту, и их называют тоберморитоподобными фазами. Гидратация  $\beta$ - $C_2S$  в тех же условиях идет по приведенной схеме, причем известь выделяется в меньшем количестве.

Взаимодействие  $C_3A$  с водой протекает с большей скоростью при температуре затворения  $21\text{ }^\circ\text{C}$  и значительном выделении тепла.

Трехкальциевый алюминат при взаимодействии с водой в присутствии двуводного гипса, гидратируясь при обычных температурах, образует комплексные соединения, трисульфогидроалюминат кальция (эттринит), который

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		18

предотвращает дальнейшую быструю гидратацию  $C_3A$  за счет образования защитного слоя и замедляет (до 3...5 ч) первую стадию процесса твердения – схватывание цемента. Вместе с тем добавка гипса ускоряет процесс твердения цемента в первые сроки гидратации.

Алюмоферритная фаза, представленная в обыкновенных портландцементе четырехкальциевым алюмоферритом, условиях гидратации портландцемента, т.е. насыщенного известью раствора, при нормальной температуре взаимодействует с водой стехиометрически.

В результате образуются весьма устойчивые смешанные кристаллы.

Кроме описанных химических преобразований, протекающих при твердении цемента, большое значение имеют физические и физико-химические процессы, которые сопровождают химические реакции и приводят при затворении водой к превращению цемента сначала в пластичное тесто, а затем в прочный затвердевший камень.

Изучению химических и физических преобразований твердеющего цементного теста было посвящено много работ. В современном представлении механизм и последовательность процессов твердения могут быть представлены следующим образом. После добавления к цементу воды образуется раствор, который пересыщен относительно гидроксида кальция и содержит ионы  $Ca^{2+}$ ,  $OH^-$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ . Из этого раствора в качестве первичных новообразований осаждаются гидросульфалюминат и гидроксид кальция. На этом этапе упрочнения системы не происходит, гидратация минералов носит как бы скрытый характер. Второй период гидратации (схватывание) начинается примерно через час с образованием вначале очень тонких кристаллов гидросиликатов кальция.

Гидросиликаты и гидросульфалюминаты кальция растут в виде длинных волокон, пронизывающих жидкую фазу в виде мостиков, заполняющих поры. Образуется пористая матрица, которая постепенно упрочняется и заполняется продуктами гидратации. В результате подвижность твердых частиц снижается и цементное тесто схватывается. Такая первая высокопористая с низкой

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		19

прочностью структура, обуславливающая схватывание, состоит главным образом из продуктов взаимодействия с водой  $C_3A$  и гипса.

В течение третьего периода (твердения) поры постепенно заполняются продуктами гидратации клинкерных минералов, происходит уплотнение и упрочнение структуры цементного камня в результате образования все большего количества гидросиликатов кальция.

В конечном виде цементный камень представляет собой неоднородную систему – сложный конгломерат кристаллических и коллоидных гидратных образований, непрореагировавших остатков цементных зерен, тонкораспределенных воды и воздуха. Его называют иногда микробетоном.

Структура цементного камня. Отвердевший цементный камень представляет собой микроскопически неоднородную систему, состоящую из кристаллических сростков и гелеобразных масс, имеющих частицы коллоидных размеров. Неоднородность структуры цементного камня усиливается и тем, что в нем содержатся зерна цемента, не полностью прореагировавшие с водой.

Существенно влияют на структуру цементного камня гипс и гидравлические добавки, так как в результате их реакции с клинкерными компонентами цементного камня образуются новые продукты. Подбирая минералогический состав клинкера и получая необходимый состав цемента, дающий при твердении то кристаллические сростки, то гелевую структурную составляющую, можно воздействовать на структуру и физико-механические свойства цементного камня и бетона.

Различие в физико-механических свойствах кристаллического и коллоидного гелеобразного вещества является одной из причин влияния минералогического состава клинкера на некоторые, основные строительные свойства цемента: деформативность, стойкость при переменном замораживании и оттаивании, увлажнении и высушивании. Путем рационального подбора минералогического состава клинкера можно регулировать свойства портландцемента и получить цемент, по качеству удовлетворяющий конкретным эксплуатационным условиям.

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		20

На структуру бетона оказывает значительное влияние пористость цементного камня, связанная с начальным содержанием воды в бетонной смеси. Для получения удобоукладываемой бетонной смеси в нее вводят в 2...3 раза больше воды, чем требуется на реакцию с цементом. Таким образом, большая часть воды затвердения оказывается в свободном состоянии и образует в затвердевшем камне множество мелких пор. Поэтому для получения плотной структуры цементного камня необходимо применять бетонные смеси с минимальным содержанием воды. В результате повышаются прочность и морозостойкость бетона; Структура цементного камня, а именно наличие в нем пор и гелеобразного вещества, обуславливает склонность его к влажностным деформациям. При увлажнении он разбухает, а при высушивании дает усадку. Знакопеременные сжимающие и растягивающие напряжения, вызываемые изменением влажности окружающей среды, расшатывают структуру цементного камня и понижают прочность бетона. Степень влажностных деформаций зависит от соотношения гелеобразных и кристаллических фаз в цементном камне. С увеличением последней стойкость камня в таких условиях, называемая воздухоустойчивостью, повышается. В отличие от рассмотренных далее пуццолановых портландцементов обыкновенный портландцемент отличается высоко-воздухоустойчивостью.

Расширение и растрескивание цементного камня могут вызвать также свободные CaO и MgO, присутствующие в цементе при низком качестве обжига. Гашение их сопровождается значительным увеличением в объеме, и продукты этого гашения разрывают цементный камень. О таком цементе говорят, что он не отвечает требованиям стандарта в отношении равномерности изменения объема при твердении.

Прочность портландцемента. Согласно ГОСТ, прочность портландцемента характеризуют пределами прочности при сжатии и изгибе. Марку цемента устанавливают по пределу прочности при изгибе образцов балочек 40X40X160 мм и при сжатии их половинок, изготовленных из раствора состава 1:3 (по массе) с нормальным песком при водоцементном отношении 0,4 и испытанных через

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		21

28 суток; образцы в течение этого времени хранят во влажных условиях при температуре  $(20\pm 2)$  °С. Предел прочности при сжатии в возрасте 28 суток называется активностью цемента.

Для приготовления образцов применяют чистый кварцевый песок постоянного зернового и химического составов, что позволяет исключить влияние качества песка на прочность цемента и получить сравнимые результаты. Прочность портландцемента нарастает неравномерно: на третий день она достигает примерно 40...50 % марки цемента, а на седьмой – 60...70 %. В последующий период рост прочности цемента еще более замедляется, и на 28 день цемент набирает марочную прочность. Однако при благоприятных условиях твердение портландцемента может продолжаться месяцы и даже годы, в 2...3 раза превысив марочную (суточную) прочность. Можно считать, что в среднем прирост прочности портландцемента подчиняется логарифмическому закону.

Теоретический предел прочности цементного камня при сжатии очень велик, составляет более 240...340 МПа. Практически при формовании бетонов прессованием была получена прочность 280 МПа и более.

Прочность цементного камня и скорость его твердения зависят от минералогического состава клинкера, тонралоогического состава клинкера, тонкости помола цемента, содержания воды, влажности, температуры среды и продолжительности хранения. Влияние минералогического состава на прочность портландцемента. Процесс нарастания прочности клинкерных минералов портландцемента различен. Наиболее быстро набирает прочность трехкальциевый силикат: за 7 сут твердения он набирает около 70% от 28-суточной прочности, дальнейшее нарастание прочности значительно замедляется.

Другая картина твердения двухкальциевого силиката. В начальный период твердения (до 28-суточного возраста)  $C_2S$  набирает всего до 15% прочности  $C_3S$ , но и в последующий период твердения двухкальциевый силикат начинает повышать свою прочность и в какой-то период достигает и даже может превысить прочность  $C_3S$ . Это явление объясняется тем, что трехкальциевый силикат

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		22

гидратирует быстрее, чем двухкальциевый. К 28-суточному возрасту гидратации  $C_3S$  почти заканчивается, а гидратация  $C_2S$  к этому времени начинает развиваться. Поэтому при необходимости получить бетон высокой прочности в короткие сроки применяют цемент с большим содержанием трехкальциевого силиката – так называемый алитовый цемент, и, наоборот, если требуется высокая прочность в более позднее время (например, в гидротехнических сооружениях), то можно применять белитовый цемент. Трехкальциевый алюминат сам по себе имеет низкую прочность, однако значительно ускоряет твердение цемента в начальный период. Этим свойством  $C_3A$  пользуются, получая быстротвердеющий портландцемент. По минералогическому составу он отличается высоким содержанием  $C_3A$  и  $C_3S$  (около 60...70%, в том числе до 10%  $C_3A$ ).

Тонкость помола. С увеличением тонкости помола прочность цемента возрастает. Средний размер зерен портландцемента, выпускаемого отечественными заводами, составляет примерно 40 мкм.

Таким образом, при обычном помоле портландцемента 30...40% клинкерной части его не участвует в твердении и формировании структуры камня. С увеличением тонкости помола цемента увеличивается степень гидратации цемента, возрастает содержание клеящих веществ – гидратов минералов – и повышается прочность цементного камня. Заводские цементы должны иметь тонкость помола, характеризуемую остатком на сите №008 (размер ячейки в свету 0,08 мм) не более 15%. Обычно она равна 8...12%. Тонкость помола цемента характеризуется также величиной удельной поверхности ( $m^2/kg$ ), суммарной поверхностью зерен ( $m^2$ ) в 1 кг цемента. Удельная поверхность заводских цементов составляет 250...300  $m^2/kg$ . В ряде случаев с целью повышения активности заводского цемента и для получения быстротвердеющего цемента тонкость помола повышают. Условно считают, что прирост удельной поверхности цемента на каждые 100  $m^2/kg$  повышает его активность на 20...25 %.

Увеличение удельной поверхности цемента более 300... 350  $m^2/kg$  связано со значительным снижением производительности мельниц; кроме того, такие цементы увеличивают водопотребность, растет тепловыделение, возрастают

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		23

усадочные деформации. Водопотребность цемента определяется количеством воды (% от массы цемента), необходимым для получения теста нормальной густоты. Водопотребность портландцемента 24...28 %, при введении активных минеральных добавок осадочного происхождения (диатомита, трепела, опоки) водопотребность повышается до 32...37 %.

Влияние влажности и температуры среды. Твердение цементного камня и повышение его прочности могут продолжаться только при наличии в нем воды, так как твердение есть в первую очередь процесс гидратации.

Большое влияние на рост прочности цементного камня оказывают влажность и температура среды. Скорость химических реакций между клинкерными минералами и водой увеличивается с повышением температуры, а также значительно возрастает скорость уплотнения продуктов гидратации цемента. Твердение цементного камня на практике может происходить в широком диапазоне температур: нормальное твердение – при температуре 15...20 °С, пропаривание – 80...90 °С, автоклавная обработка – до 170...200 °С, давление пара – до 0,8...1,2 МПа и твердение – при отрицательной температуре. Наиболее быстрый рост прочности цементного камня происходит при пропаривании под давлением в автоклавах, при этом бетон через 4...6 часов приобретает марочную прочность.

В условиях пропаривания при нормальном давлении твердение бетона происходит примерно в 2 раза медленнее, чем в автоклавах. Бетоны, подвергнутые тепловлажностной обработке при температуре до 100 °С, в большинстве случаев приобретают только 70 % проектной прочности и лишь иногда достигают 100 %. Дальнейший рост их прочности, как правило, не наблюдается.

Твердения портландцементного камня при отрицательных температурах не происходит, так как вода превращается в лед. Однако за счет добавки  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{NaCl}$  или их смеси бетон все же набирает прочность. Добавление к цементу электролитов в количестве 5 % и более от массы цемента повышает концентрацию растворенных веществ в воде и понижает температуру ее

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		24

замерзания. Кроме того, хлористые соли являются ускорителями твердения цемента. Однако применение этих солей в количестве более 2 % в железобетонных конструкциях не рекомендуется из-за возможной коррозии арматуры. В последнее время в качестве противоморозной добавки используют нитрит натрия  $\text{NaNO}_2$ .

Продолжительность хранения. Длительное хранение цемента даже в самых благоприятных условиях влечет за собой некоторую потерю его активности. После 3 месяцев хранения потеря активности цемента может достигать 20 %, а через год – 40 %. Цементы более тонкого помола теряют больший процент активности, так как влага воздуха, соприкасаясь с цементом, вызывает преждевременную гидратацию цемента. Восстанавливать активность лежалого цемента можно вторичным помолом. Наиболее эффективен вибропомол цемента, в процессе которого повышается тонкость помола цемента, а также происходит обдирка гидратных и инертных оболочек с цементных зерен. Наиболее целесообразным методом предотвращения потери активности цемента является гидрофобизация.

Стойкость цементного камня. Бетон в инженерных сооружениях в процессе эксплуатации может быть подвержен агрессивному воздействию внешней среды: пресных и минерализованных вод, совместному действию воды и мороза, попеременному увлажнению и высушиванию. Среди компонентов бетона цементный камень наиболее подвержен развитию коррозионных процессов. Для того чтобы бетон стойко сопротивлялся агрессивному воздействию внешней среды, цементный камень должен быть коррозиестойким, морозостойким и атмосферостойким.

Коррозия цементного камня в водных условиях по ряду ведущих признаков может быть разделена на три вида:

1 вид коррозии – разрушение цементного камня в результате растворения и вымывания некоторых его составных частей. Наиболее растворимой является гидроксид кальция, образующийся при гидролизе трехкальциевого силиката. Растворимость  $\text{Ca(OH)}_2$  невелика (1,3 г CaO на 1 л при 15 °C), но из цементного камня в бетоне под воздействием проточных мягких вод количество

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		25



растворенного и вымытого  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  непрерывно растет, цементный камень становится пористым и теряет прочность. Следует отметить, что  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  хорошо растворяется в водах, которые содержат в незначительном количестве катионы кальция и магния в виде бикарбонатов  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  и  $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ , придающих воде временную жесткость.

Несколько предохраняет от данного вида коррозии защитная корка из углекислого кальция, образующаяся на поверхности бетона в результате реакции между гидроксидом кальция и углекислотой воздуха  $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ .

Растворимость  $\text{CaCO}_3$  в воде почти в 100 раз меньше растворимости  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Однако существенное повышение стойкости цементного камня в пресных водах достигается введением в цемент гидравлических добавок. Они связывают  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в малорастворимое соединение – гидросиликат кальция.

Следующей мерой защиты бетона от 1 вида коррозии является применение цемента, выделяющего при своем твердении минимальное количество свободной  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Таким цементом являются белитовый, содержащий небольшое количество трехкальциевого силиката.

Вид коррозии – разрушение цементного камня водой, содержащей соли, способные вступать в обменные реакции с составляющими цементного камня. При этом образуются продукты которые либо легко растворимы и уносятся фильтрующей через бетон водой, либо выделяются в воде аморфной массы, не обладающей связующими свойствами. В результате таких преобразований увеличивается пористость цементного камня и, следовательно, снижается его прочность.

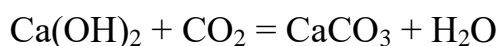
Наиболее характерны среди упомянутых обменных реакций те, которые протекают под действием хлористых и сернокислых солей. Сернокислый магний, взаимодействуя с  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  цементного камня, образует гипс и гидроксид магния – аморфное вещество, не обладающее связностью и легко вымываемое из бетона.

Между  $\text{MgCl}_2$  и  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  протекает реакция.

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		26

Образовавшийся хлористый кальций хорошо растворяется в воде и уносится фильтрующей водой.

Коррозия цементного камня водами, содержащими свободные углекислоту и ее соли, происходит в такой последовательности. Вначале растворенная углекислота взаимодействует с  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ :



и образуется труднорастворимый углекислый кальций, что положительно сказывается на сохранности бетона. Однако при высоком содержании в воде  $\text{CO}_2$  углекислота действует разрушающе на цементный камень вследствие образования легкорастворимого бикарбоната кальция:

$\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  Приведенные реакции, схематически характеризующие разрушение цементного камня под действием воды, содержащей растворенные соли, показывают, что основной причиной этого разрушения является содержание в цементном камне (бетоне) свободного гидроксида кальция  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Если же ее связать в другое труднорастворимое соединение, сопротивление бетона коррозии II вида должно возрасти. Это и имеет место при использовании активных минеральных добавок.

К 3 виду коррозии относятся процессы, возникающие под действием сульфатов. В порах цементного камня происходит отложение малорастворимых веществ, содержащихся в воде, или продуктов взаимодействия их с составляющими цементного камня. Их накопление и кристаллизация в порах вызывают значительные растягивающие напряжения в стенках пор и приводят к разрушению цементного камня.

Характерным видом сульфатной коррозии цементного камня является взаимодействие растворенного в воде гипса с трехкальциевым гидроалюминатом.

При этом образуется труднорастворимый гидросульфалюминат кальция, который, кристаллизуясь, поглощает большое количество воды и значительно увеличивается в объеме (примерно в 2,5 раза), что оказывает сильное разрушающее действие на цементный камень.

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		27

В результате реакции образуются кристаллы в виде длинных тонких игл, напоминающих под микроскопом некоторые бациллы. Имея такое внешнее сходство и разрушающее действие на цементный камень, гидросульфоалюминат кальция получил название «цементная бацилла». Цемент с низким содержанием трехкальциевого алюмината должен обладать повышенной сульфатостойкостью.

Исключить или ослабить влияние коррозионных процессов при действии различных вод можно конструктивными мерами, путем улучшения технологии приготовления бетона и применения цементов определенного минералогического состава и необходимого содержания активных минеральных добавок.

Используя конструктивные меры, предотвратить действие воды на бетонную конструкцию возможно путем устройства гидроизоляции, водоотводов и дренажей. Повышение водостойкости бетона технологическими средствами достигается интенсивным уплотнением бетона при укладке или формовании, использованием бетонных смесей с минимальным водоцементным отношением, с тщательно подобранным зерновым составом заполнителей.

Роль активных минеральных добавок (трепела, опоки, диатомита, доменных гранулированных шлаков) в повышении водостойкости портландцемента рассмотрена ранее.

Морозостойкость. Совместное попеременное действие воды и мороза влечет за собой разрушение бетонных сооружений. При отрицательных температурах вода, находящаяся в порах цементного камня, превращается в лед, который увеличивается в объеме примерно на 9% по сравнению с объемом воды. Лед давит на стенки пор и разрушает их.

Морозостойкость цементного камня зависит от минералогического состава клинкера, тонкости помола цемента и водоцементного отношения. До определенной тонкости помола (5000... 6000 см<sup>2</sup>/г) морозостойкость цемента увеличивается, но при дальнейшем возрастании тонкости помола морозостойкость падает. Это объясняется пористой структурой новообразований цемента сверхтонкого измельчения.

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		28

Присутствие в цементе в значительном количестве активных минеральных добавок отрицательно влияет на морозостойкость цементного камня вследствие высокой пористости их и низкой морозостойкости продуктов взаимодействия добавок с компонентами цементного камня. Среди минералов клинкера наименее морозостойким является  $C_3A$ , поэтому его содержание в цементе для морозостойких бетонов не должно превышать 5...7 %.

Увеличение водоцементного отношения понижает морозостойкость цементного камня вследствие повышения его пористости. Таким образом, для увеличения морозостойкости бетона необходимо применять цементы с низким содержанием  $C_3A$ , с минимальным содержанием активных минеральных добавок и использовать бетонные смеси с возможно меньшим водоцементным отношением, тщательно уплотняя смесь при укладке.

Значительно повышают морозостойкость бетона поверхностно-активные добавки (СДБ, мылонафт). Пластифицирующие добавки СДБ существенно снижают водопотребность бетонных смесей при сохранении заданной подвижности и тем самым уменьшают пористость цементного камня. Некоторые гидрофобизирующие добавки обладают воздухововлекающей способностью (пузырьки воздуха в бетонной смеси амортизируют давление льда), повышают однородность структуры цементного камня (придают водоотталкивающие свойства) и гидрофобизируют стенки пор и капилляров, увеличивая тем самым сопротивляемость цементного камня действию воды.

Надо иметь в виду, что замораживание цементного камня в начальный период твердения является наиболее опасным, так как он еще не обладает достаточной прочностью и не может энергично сопротивляться действию льда.

## 1.2 Процессы твердения портландцементного клинкера в присутствии гидравлических добавок

Пуццолановые цементы содержат 20 – 80% гидравлических добавок. Гидравлические добавки придают цементам водостойкость, образуя нерастворимые силикаты, алюминаты и ферриты.

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		29

Защиту бетона от коррозии производят как введением специальных добавок в рабочую смесь при изготовлении –бетонных изделий, так и нанесением изоляции из битумных материалов и эпоксидных смол. В особо ответственных случаях осуществляют оба способа защиты. Так, в агрессивных грунтовых водах укладывают железобетонные трубы, изготовленные центробежным –способом на пуццолановом цементе с гидравлическими добавками, которые повышают их водонепроницаемость и химическую стойкость. Кроме того, эти трубы покрывают снаружи изоляционным слоем, а также двумя слоями торкрета с последующей обмазочной изоляцией. Для защиты наружной поверхности бетонных сооружений применяют жесткие или пластичные изоляционные материалы.

Химический анализ цемента существенно не отличается от общего анализа силикатов. Отличным является то, что при анализе цемента навеску, как правило, не сплавляют с содой, а растворяют в соляной кислоте. С содой ее сплавляют в том случае, если в цементе имеются гидравлические добавки или песок, не растворимые в соляной кислоте, а в шлакопортландцементах – кислые шлаки. В цементах, не содержащих гидравлических добавок, определяют кроме основных составляющих содержание нерастворимого осадка

Сущность метода определения активности гидравлических добавок заключается в следующем. Если в строго определенное количество титрованного раствора  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  поместить на определенный промежуток времени навеску гидравлической добавки, то она, реагируя с гидроксидом кальция, поглотит из раствора некоторое количество последнего, в результате чего концентрация  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в растворе уменьшится. Определив оставшееся в растворе количество  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и установив разность между первоначальным и конечным содержанием его в растворе, можно подсчитать количество гидрата окиси кальция, поглощенное введенной в раствор навеской гидравлической добавки за время пребывания ее в растворе. Изменение концентрации  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в растворе определяют титрованием этого раствора титрованным раствором соляной кислоты.

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		30

Среднюю пробу испытываемой гидравлической добавки измельчают на куски величиной примерно 1 см в диаметре, отбирают 50 – 100 г измельченного материала, высушивают в сушильном шкафу при 105 – 110 °С и сухую пробу растирают в фарфоровой ступке в тонкий порошок. От этой пробы отбирают около 10 г и повторно тщательно растирают в агатовой ступке до тех пор, пока вся масса при просеивании пройдет через сито № 008. Измельченную таким образом массу повторно высушивают в сушильном шкафу до постоянного веса и помещают в стеклянную банку с хорошо притертой пробкой, в которой и хранят до испытания.

Метод определения содержания гидравлической добавки в цементе основан на уменьшении количества соляной кислоты, реагирующей с цементом в присутствии добавки. С увеличением в цементе количества гидравлической добавки уменьшается количество HCl, реагирующей с навеской цемента. По величине этого уменьшения определяют количество молотого клинкера, замененного в готовом цементе гидравлической добавкой. При испытании берут две равные навески по 0,25 г – одну клинкера, а другую цемента и добавляют в каждую 10 мл 1 н. HCl и избыток оттитровывают 0,25 н. раствором едкого натра. Указанное определение является одним из методов контроля цементного производства.

Активность гидравлической добавки должна быть не менее 200 мг СаО на 1 г добавки.

К активным минеральным гидравлическим добавкам относятся природные или искусственно полученные вещества, тонкоизмельченная смесь которых с воздушной известью, затворенная водой, образует тесто, которое после затвердения на воздухе продолжает твердеть под водой.

К настоящему времени наметился ряд направлений утилизации бокситовых шламов окускование руд и концентратов комплексная переработка на чугун, глинозем и цемент, смешанные цементы, гидравлические добавки в портландцемент заполнители для рядовых, жаростойких и асфальтобетонов, дорожные покрытия стекло, обожженный и силикатный кирпич, стеклошлаковые

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		31

материалы и заполнители, канализационные трубы получение красок закладочные и литейные формовочные смеси строительство шламоохранилищ производство сорбентов, коагулянтов и катализаторов выпуск удобрений.

Наибольшее значение как вяжущий материал в строительстве имеет портландцемент. Он представляет собой продукт помола клинкера, полученного обжигом до спекания смесей из известняков и глин, встречающихся в природе (мергели), или искусственно составленных. При помоле к клинкеру добавляется гипс (до 2%) – для замедления схватывания – и гидравлические добавки (до 15%), увеличивающие стойкость портландцемента к разрушающему действию природных вод.

В зависимости от активности гидравлической добавки меняется содержание ее в смешанном вяжущем. Оптимальная дозировка добавки устанавливается специальными опытами, определяющими способность добавки связывать гидрат окиси кальция из смеси гипсоцементнопуццоланового вяжущего с водой. Концентрация  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в водной суспензии не должна превышать 1,1 г/л через 5 суток и 0,85 г/л через 7 суток от начала опыта.

Гидравлическими добавками природного происхождения являются туфы, пеплы, трассы, пемзы, перлиты, диатомиты, трепелы, опоки, глиежи и т. д. К искусственным гидравлическим добавкам относятся металлургические и топливные шлаки, обожженные глинистые и углистые сланцы, отходы кремнезема при извлечении из глин окиси алюминия (глинозема).

Гидравлические добавки содержат в своем составе в основном активный кремнезем  $\text{SiO}_2$ , который в водной среде реагирует с  $\text{CaO}$  и  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и образует сначала силикаты, а затем и гидросиликаты кальция, превращающие смесь воздушной извести с гидравлическими добавками в массу, способную твердеть не только на воздухе, но и продолжающую твердеть и в водной среде. При взаимодействии кислых гидравлических добавок с портландцементом добавки реагируют с образующейся во время гидролиза клинкерных минералов гидроокисью кальция  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , образуя гидросиликаты кальция, повышающие антикоррозионные свойства цементного камня. Прибавление гидравлических

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		32

добавок к портландцементу значительно удешевляет его стоимость, не снижая свойств вяжущего вещества.

Вместо портландцемента и гидравлической добавки можно применять готовый пуццолановый портландцемент с нужным количеством добавки. Портландцемент и гидравлические добавки можно вводить и непосредственно в варочные котлы при производстве строительного гипса. Получение водостойких материалов возможно и при замене в смешанном вяжущем портландцемента доменным гранулированным шлаком. Такое гипсошлакоцементное вяжущее (ГШЦВ) состоит из 40 – 65 % строительного гипса или ангидрита, 30 – 50 % гранулированного кислого доменного шлака и 5 – 8% портландцемента. Возможно применение комбинированных добавок с получением цементов, состоящих из 40 – 60 % гипса, 25 – 40 % гранулированного шлака, 15 – 20 % гидравлической добавки и 1 – 2 % извести.

Расширяющийся портландцемент является гидравлическим вяжущим веществом, получаемым путем совместного помола портландцементного клинкера, высокоглиноземистого шлака, гипса и активной гидравлической добавки.

Активными минеральными или гидравлическими добавками называют природные и искусственные материалы, которые при смешении в тонкоизмельченном виде с воздушной известью придают ей свойства гидравлического вяжущего вещества, а в смеси с портландцементом повышают водо- и сульфатостойкость.

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		33



## 2 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 2.1 Определение нормальной густоты и подготовка образцов

Аппаратура:

- Прибор Вика с иглой и пестиком;
- Кольцо к прибору Вика;
- Мешалка для приготовления цементного теста.

Определение нормальной густоты: В соответствии с ГОСТ 310.3–76 «Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема» прибор Вика (рисунок 2) имеет цилиндрический металлический стержень 1, свободно перемещающийся в обойме станины 2. Для закрепления стержня на требуемой высоте служит стопорное устройство 3. Стержень снабжен указателем 4 для отсчета перемещения его относительно шкалы 5, прикрепленной к станине. Шкала имеет цену деления 1 мм.

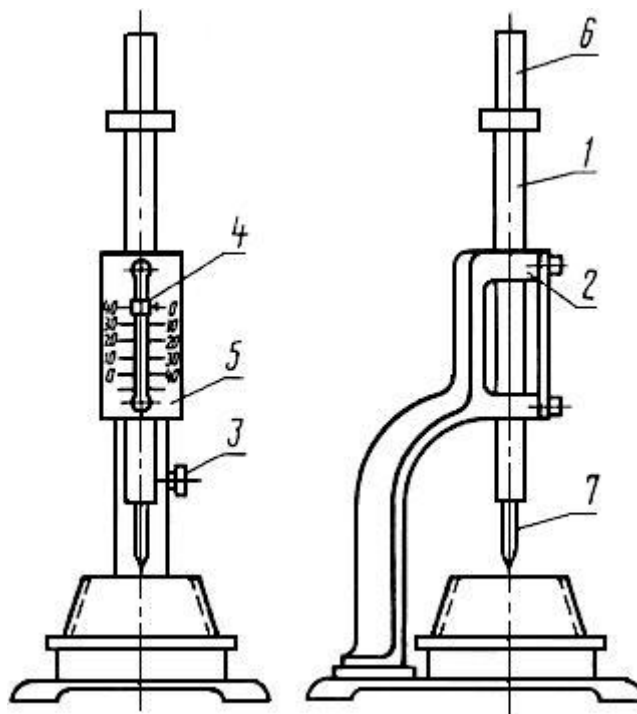


Рисунок 2 – Прибор Вика

При определении нормальной густоты цементного теста в нижнюю часть стержня вставляют металлический цилиндр-пестик б.

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		34

При определении сроков схватывания пестик заменяют иглой 7. Пестик должен быть изготовлен из нержавеющей стали с полированной поверхностью. Игла должна быть изготовлена из стальной жесткой нержавеющей проволоки с полированной поверхностью и не должна иметь искривлений. Поверхность пестика и иглы должна быть чистой. Массу перемещающейся части прибора сохраняют взаимной перестановкой пестика и иглы. Отдельные детали перемещающейся части прибора подбирают таким образом, чтобы их общая масса находилась в пределах  $(300 \pm 2)$  г. Размеры иглы и пестика должны соответствовать указанным на рисунках 3 и 4.

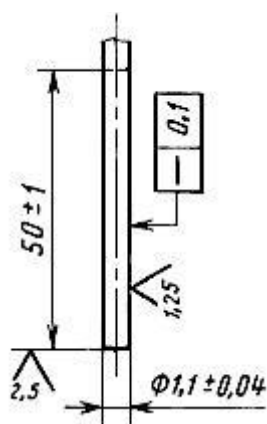


Рисунок 3 – Рабочая часть иглы

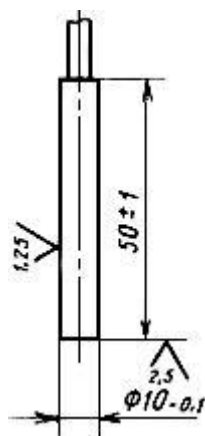


Рисунок 4 – Рабочая часть пестика

Кольцо к прибору Вика и пластинка, на которую устанавливают кольцо, должны быть изготовлены из нержавеющей стали, пластмассы или другого не впитывающего воду материала. Форма и размеры кольца должны соответствовать указанным на рисунке 5.

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		35

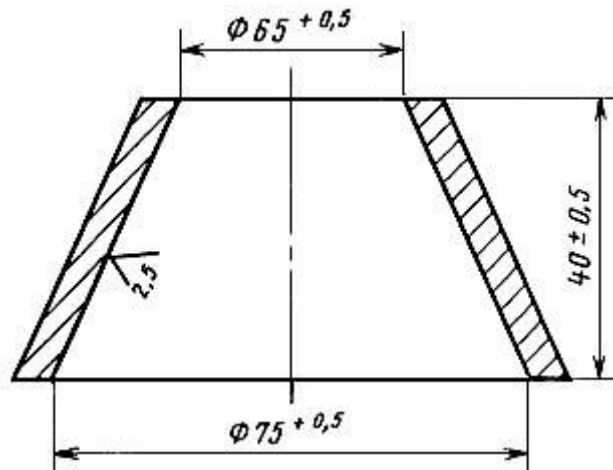


Рисунок 5 – Кольцо к прибору Вика

Мешалка для приготовления цементного теста должна отвечать требованиям соответствующих технических условий. При отсутствии в лаборатории механизированной мешалки для приготовления цементного теста применяют чашу сферической формы (рисунок 6), изготовленную из нержавеющей стали.

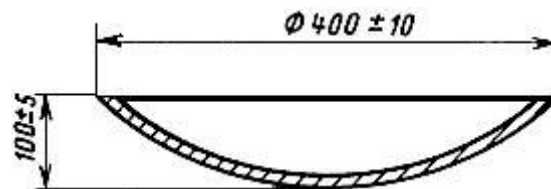


Рисунок 6 – Чаша для затворений

Лопатку для перемешивания цементного теста изготавливают из упругой нержавеющей стали. Основные размеры лопатки указаны на рисунке 7.

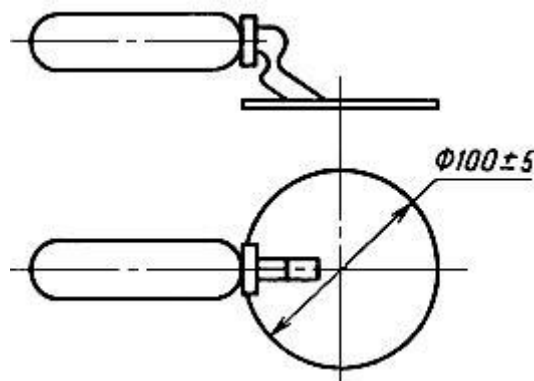


Рисунок 7 – Лопатка для перемешивания

### Проведение испытаний:

Нормальной густотой цементного теста считают такую консистенцию его, при которой пестик прибора Вика, погруженный в кольцо, заполненное тестом, не доходит на 5–7 мм до пластинки, на которой установлено кольцо. Нормальную густоту цементного теста характеризуют количеством воды затворения, выраженным в процентах от массы цемента.

Перед началом испытания проверяют, свободно ли опускается стержень прибора Вика, а также нулевое показание прибора, соприкасая пестик с пластинкой, на которой расположено кольцо. При отклонении от нуля шкалу прибора соответствующим образом передвигают.

Кольцо и пластинку перед началом испытаний смазывают тонким слоем машинного масла. Для ручного приготовления цементного теста отвешивают 400 г цемента, высыпают в чашу, предварительно протертую влажной тканью. Затем делают в цементе углубление, в которое вливают в один прием воду в количестве, необходимом (ориентировочно) для получения цементного теста нормальной густоты. Углубление засыпают цементом и через 30 с после приливания воды сначала осторожно перемешивают, а затем энергично растирают тесто лопаткой. Продолжительность перемешивания и растирания составляет 5 мин с момента приливания воды.

Цементное тесто на механической мешалке готовят в соответствии с прилагаемой к мешалке инструкцией. После окончания перемешивания кольцо быстро наполняют в один прием цементным тестом и пять-шесть раз встряхивают его, постукивая пластинку о твердое основание. Поверхность теста выравнивают с краями кольца, срезая избыток теста ножом, протертым влажной тканью. Немедленно после этого приводят пестик прибора в соприкосновение с поверхностью теста в центре кольца и закрепляют стержень стопорным устройством, затем быстро освобождают его и предоставляют пестик свободно погружаться в тесто. Через 30 с с момента освобождения стержня проводят отсчет погружения по шкале. Кольцо с тестом при отсчете не должно подвергаться толчкам.

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		37

При несоответствующей консистенции цементного теста изменяют количество воды и вновь затворяют тесто, добиваясь погружения пестика на глубину 5–7 мм. Количество добавляемой воды для получения теста нормальной густоты определяют с точностью до 0,25%.

## 2.2 Подготовка образцов

В соответствии с ГОСТ 10180-2012 образцы изготавливают в поверенных (калиброванных) формах, соответствующих требованиям ГОСТ 22685. Перед использованием форм их внутренние поверхности должны быть покрыты тонким слоем смазки, не оставляющей пятен на поверхности образцов и не влияющей на свойства поверхностного слоя бетона. Укладку бетонной смеси в форму и ее уплотнение следует проводить не позднее чем через 20 мин после отбора пробы.

При изготовлении нескольких серий образцов, предназначенных для определения различных характеристик бетона, все образцы следует изготавливать из одной пробы бетонной смеси и уплотнять их в одинаковых условиях. Уплотнение бетонной смеси механическими методами проводят с использованием виброплощадки. После окончания укладки и уплотнения бетонной смеси в форме верхнюю поверхность образца заглаживают мастерком или пластиной.

В соответствии с ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам» образцы должны быть выдержаны до испытания при указанных условиях в распалубленном виде в течение 24 ч, если они твердели в воде, и в течение 4 ч, если они твердели в воздушно-влажностных условиях или в условиях тепловой обработки. После распалубливания образцы помещают в камеру с нормальными условиями твердения: с температурой  $(20\pm 2)^\circ\text{C}$  и относительной влажностью воздуха  $(95\pm 5)\%$ . Образцы, предназначенные для твердения в условиях тепловой обработки, должны быть помещены в формах в тепловой агрегат (пропарочную камеру, автоклав, отсек формы или кассеты и т.д.) и твердеть вместе с конструкциями (изделиями) или отдельно по принятому на производстве режиму.

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		38

Допускаются другие условия твердения образцов, например, в воде или в условиях, аналогичных условиям твердения бетона в монолитных конструкциях, если эти условия установлены стандартами, техническими условиями или технологическими регламентами на производство работ.

### 2.3 Сроки схватывания

В нижний конец стержня прибора Вика вставляют длинную иглу и проверяют по 1.1 готовность прибора к проведению испытания, чистоту поверхности и отсутствие искривлений иглы.

Рабочая часть длинной иглы

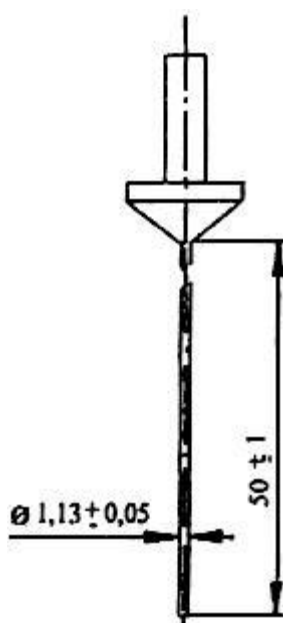


Рисунок 8 – Игла для прибора Вика

Иглу опускают до соприкосновения с поверхностью цементного теста и в этом положении закрепляют стержень стопорным устройством. Через 1-2 с освобождают стержень, предоставляя игле свободно погружаться в цементное тесто. В начале испытания, пока цементное тесто находится в пластичном состоянии, во избежание сильного удара иглы о пластинку допускается ее слегка задерживать при погружении в тесто для исключения повреждения иглы. Как только цементное тесто загустеет настолько, что опасность повреждения иглы будет исключена, игле дают свободно опускаться. Через 30 с после освобождения стержня фиксируют по шкале прибора глубину погружения иглы в цементное тесто. Затем иглу погружают в цементное тесто через каждые 10 мин, передвигая

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		39

кольцо после каждого погружения таким образом, чтобы каждое последующее погружение иглы находилось на расстоянии не менее 10 мм от мест предыдущих погружений и от края кольца. После каждого погружения иглу протирают.

В промежутках между погружениями иглы кольцо с цементным тестом на пластинке помещают в камеру (шкаф) влажного хранения. Допускается кольцо с цементным тестом накрывать влажной тканью и оставлять в помещении с относительной влажностью не менее 65%, при этом ткань не должна соприкасаться с цементным тестом.

Началом схватывания считают время от начала затворения цемента до момента, когда игла при проникновении в цементное тесто не доходит до пластинки на  $(4 \pm 1)$  мм.

#### 2.4 Определение тонкости помола по остатку на сите

Сито с контрольной сеткой N 009 по ГОСТ 6613. Допускается применение сита с сеткой N 008. Сито представляет собой цилиндрическую обойму диаметром 150-200 мм и высотой 40-100 мм, в которой на расстоянии около 10 мм от нижнего края натянута и плотно зажата контрольная сетка. Сито имеет подситную тарелку и крышку. Мы выбрали N 009.

Перед проведением испытания сетку сита осматривают в лупу и при обнаружении каких-либо дефектов (дырки, отход сетки от обоймы и др.) ее заменяют. Сито должно быть сухим и чистым.

При ручном просеивании навеску цемента массой 10 г, подготовленную, высыпают на сито, установленное на подситной тарелке. Сито закрывают крышкой и встряхивают вручную.

Операцию просеивания считают законченной, если при контрольном просеивании сквозь сито проходит не более 0,01 г цемента. Контрольное просеивание выполняют вручную при снятой подситной тарелке на бумагу в течение 1 мин.

Остаток на сите взвешивают и выражают в процентах к первоначальной массе цемента.

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		40

## 2.5 Прочность при сжатии и изгибе

Трехлучевая отрывная форма размером 40x40x160 мм используется для изготовления образцов пучка. Конструкция пресс-формы должна обеспечивать возможность удаления отлитых образцов из пресс-формы без повреждений. Форма должна быть изготовлена из материалов, обеспечивающих сохранение размера и формы образца. Продольные и поперечные стенки формы должны быть помечены номерами, чтобы облегчить сборку, а когда они зафиксированы, они должны быть близко друг к другу и закреплены на нижней пластине, чтобы вода не вытекала из формы. Подложка должна быть достаточно твердой, чтобы предотвратить вторичную вибрацию. Оборудование для удаления и очистки пресс-формы должно обеспечивать правильное выполнение операций без повреждения образца и деталей пресс-формы.

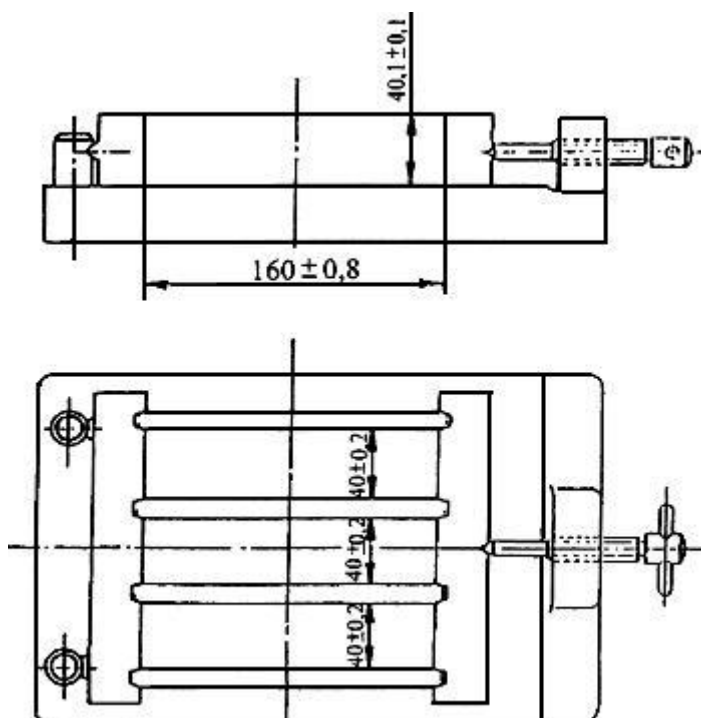


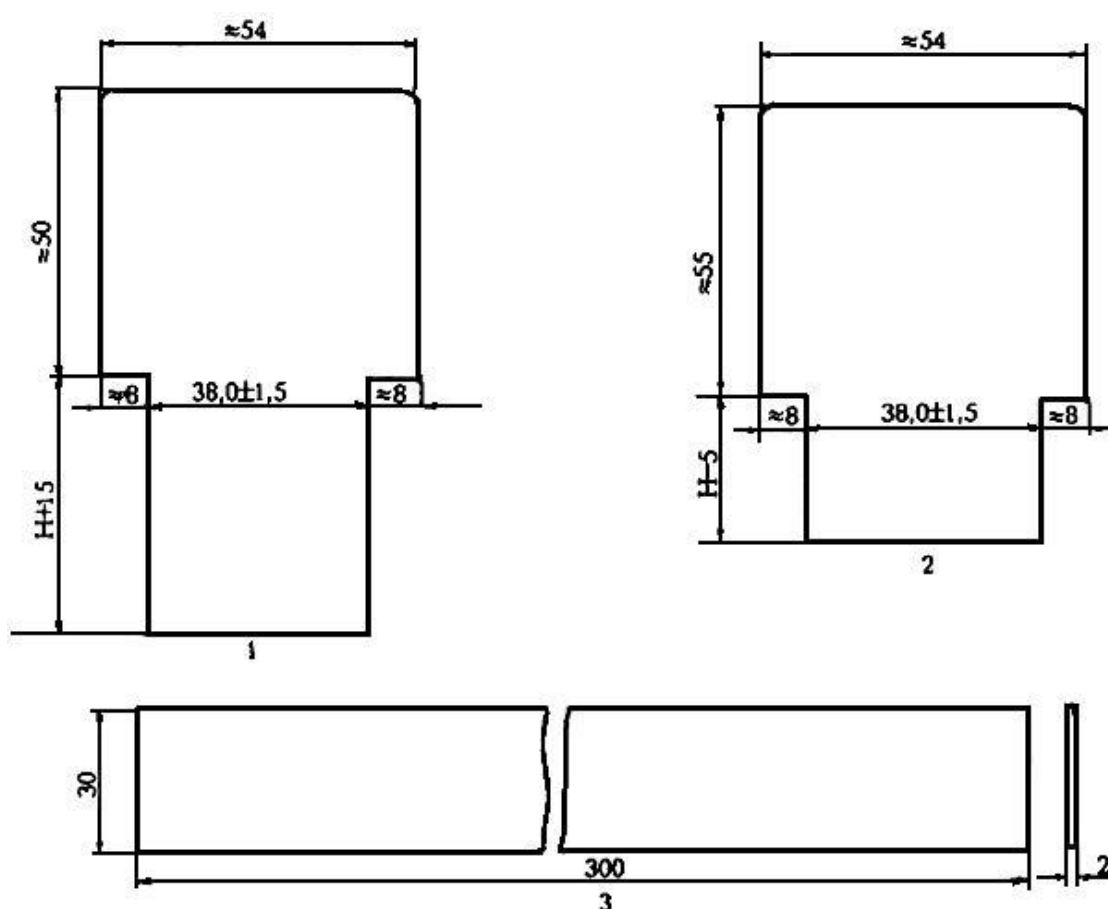
Рисунок 9 – Форма для изготовления образцов-балочек

Сопло пресс-формы высотой 20-40 мм имеет фиксаторы на внешней стенке для обеспечения правильной установки на пресс-форму. Максимальная разница между внутренней стенкой сопла и формой не должна превышать 1 мм.



Пластина пресс-формы размером 210x185 мм изготовлена из стекла толщиной 6 мм с полированными краями или другими водостойкими материалами.

Оборудование для укладки цементного раствора в формы, в том числе два типа лезвий и линейек.



Н-высота насадки

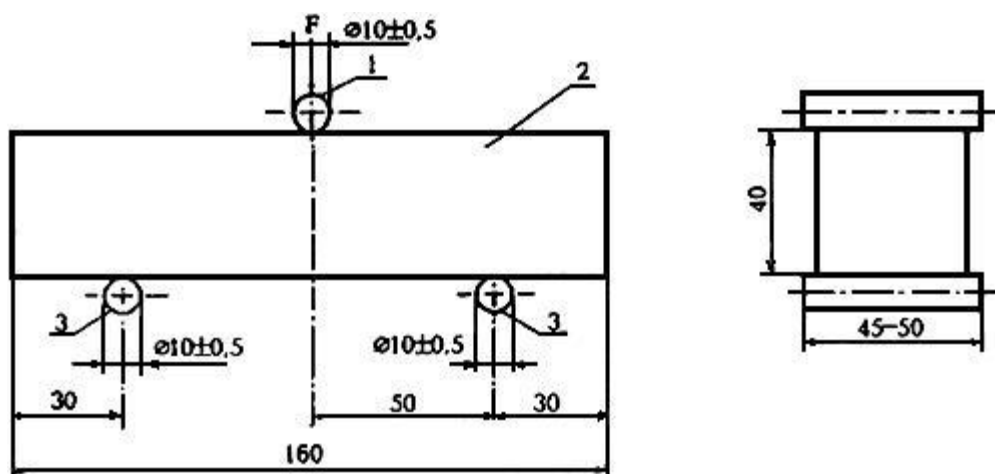
1 - лопатка для первого слоя; 2 - лопатка для второго слоя; 3 -  
металлическая линейка

Рисунок 10 – Приспособления для укладки цементного раствора в форму

Вибростол для уплотнения раствора в форме, который предназначен для плавного и беспристрастного подъема платформы стола на высоту  $(15 \pm 0,3)$  мм и может свободно падать с этой высоты, пока не достигнет неподвижности Препятствия. Общая масса подвижной части рабочего стола и пустой пресс-формы, насадки и пресс-формы должна составлять  $(20 \pm 0,5)$  кг. Число ударов для

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		42

каждого рабочего цикла должно быть 60, а частота должна составлять один ход в секунду. Стол должен автоматически закрываться после 60 кликов.



1 - нагрузочный элемент; 2 - образец-балочка; 3 - опора

Рисунок 11 – Схема расположения образца-балочки при испытании на изгиб

Машина для испытания на сжатие половинок образцов-балочек любой конструкции с предельной нагрузкой до 500 кН, обеспечивающая нагружение образца в режиме чистого сжатия. Погрешность измерения нагрузки не должна быть более  $\pm 1\%$  в верхних 4/5 диапазона измерения. Машина должна иметь подвижную шаровую опору для компенсации пространственных непараллельностей опорных граней образца. Машина должна быть снабжена нажимными пластинками для передачи нагрузки на половинки образцов-балочек и приспособлением для централизованной установки нажимных пластинок, смещение которых относительно оси системы нагружения не должно превышать  $\pm 0,5$  мм. Нажимные пластинки должны быть изготовлены из нержавеющей стали твердостью не менее 60 HRCГОСТ 30744-2001 Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка (с Поправкой), размерами: толщина не менее 10 мм, ширина  $(40 \pm 0,1)$  мм, длина  $(40 \pm 0,1)$  мм.

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		43

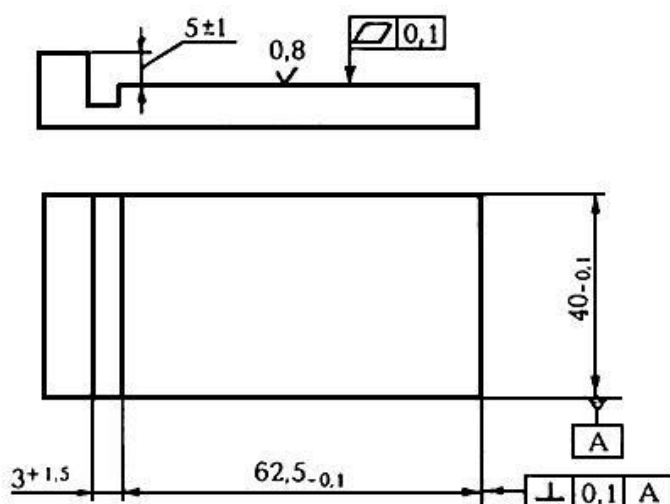


Рисунок 12 – Нажимная пластинка для передачи нагрузки на половинку образца-балочки

Прибор для испытания на изгиб образцов-балочек и машина для испытания на сжатие половинок образцов-балочек могут быть совмещены в одной испытательной машине.

Температура в камере (шкафу) влажного хранения должна быть  $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$ , относительная влажность - не менее 90%. Температуру и влажность следует регистрировать непрерывно или периодически не реже, чем через каждые 4 ч.

Ванна для хранения проб воды. Сетка имеет сетку из некоррозийных материалов для размещения проб пучка.

## 2.6 Дифференциально-термический анализ

Термический анализ применяется для исследования фазового состава готовых образцов пенобетона, и является совокупностью трех методов: дифференциально-термического анализа (ДТА), термогравиметрического или термовесового (ТГ) и дифференциально-термогравиметрического (ДТГ).

Дифференциально-термический анализ основан на изучении фазовых изменений в материале при его нагревании. Отслеживаются тепловые эффекты при этих превращениях.

Эндотермические эффекты на дифференциальной кривой могут быть вызваны следующими физико-химическими процессами:

– дегидратацией вещества;

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		44

- диссоциацией;
- некоторыми полиморфными превращениями;
- плавлением.

Причинами экзотермического эффекта могут быть:

- реакция окисления;
- реакция образования новых соединений;
- полиморфные превращения, сопровождающиеся переходом неустойчивой при данной температуре модификации в устойчивую;
- переход из аморфного состояния в кристаллическое.

При динамическом взвешивании в процессе непрерывного нагревания осуществляется получение кривых потери массы вещества ТГ.

Исследования проводятся на дериватографе системы “Luxx STA 409” немецкой фирмы “Netsch”. Режим съемки и условия проведения испытаний назначались по данным литературных источников. Скорость подъема температуры в печи – 10 °С/мин, максимальная температура нагрева – 1000 °С. Для проведения испытания использовали платиновые тигли, нагрев проводили в среде азота.

## 2.7 Рентгенофазовый анализ

Под рентгенографическим анализом понимается совокупность разнообразных методов исследования, в которых используется рентгеновское излучение - поперечные электромагнитные колебания с длиной волны  $10^{-2}$  -  $10^2$  А. В рентгеновских трубках для получения рентгеновского излучения используют столкновение электронов, ускоренных под действием высокого напряжения с металлическим антикатодом. Возникающее при этом рентгеновское излучение в зависимости от длины волны разделяют на жесткое и мягкое, в зависимости от спектрального состава - на непрерывное (сплошное), не зависящее от природы вещества антикатада, и характеристическое (линейчатое), определяемое только природой вещества антикатада; а также на полихроматическое, состоящее из волн различной длины, и монохроматическое - с определенной длиной волны. При монохроматическом в основном применяют

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		45

линии  $K_2$  -серии (возникающей при переходе электронов в атомах с L-оболочки на K-оболочку) металлов от хрома до молибдена, длины волн которых лежат в интервале от 2,3 до 0,7 А. Для монохроматизация рентгеновского излучения используются селективно поглощающие и кристаллы-монокроматоры. Применение рентгеновского излучения для исследования кристаллических веществ основано на том, что его длина волны сопоставима с расстоянием между упорядоченно расположенными атомами в решетке кристаллов, которая для него является естественной дифракционной решеткой. Сущность рентгеновских методов анализа как раз и заключается в изучении дифракционной картины, получаемой при отражении рентгеновских лучей атомными плоскостями в структуре кристаллов. Трехмерную решетку кристалла можно представить себе как совокупность параллельных равноудаленных друг от друга атомных плоскостей, образованных расположенными атомами.

## 2.8 Микрокалориметрический анализ

Калориметрический анализ – совокупность методов измерения количеств или скорости выделения (поглощения) теплоты в различных процессах, в том числе для твердеющих дисперсных систем, суммарно характеризующих элементарные акты – смачивание, адсорбцию, растворение, химические реакции, кристаллизацию и т.п. Различают изотермические, изоперболические, адиабатические (квазиадиабатические), сканирующие режимы работы калориметров.

Температурный фактор оказывает существенное влияние на формирование и изменение свойств бетона. Повышение температуры при твердении ускоряет химические реакции гидратации, что положительно влияет на рост прочности бетона. Резкое ускорение процессов твердения бетонов наступает при температурах 70–95°С, и особенно при 170–20°С. Однако при недостатке воды в бетоне воздействие повышенных температур замедляет процесс гидратации, снижает прочность бетонов. При полном испарении воды процесс твердения прекращается. Положительное влияние повышенных температур на скорость твердения бетонов послужило основой разработки и широкого применения в

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		46

технологии железобетонных конструкций тепловлажностной обработки. Бетон нагревают с помощью пара, электроэнергии, инфракрасных лучей и др.

Возникновение термических напряжений в бетоне возможно не только при его нагреве от внешних источников тепла, но и в результате саморазогрева за счет экзотермии при твердении. Трещинообразование в массивном бетоне носит обычно термический характер. Тепловыделение, или экзотермия, бетона является следствием гидратации цемента и структурообразования цементного камня.

Анализ тепловыделения (калориметрический анализ бетона) является одним из наиболее объективных высокоинформативных методов исследования, широко используемый при исследовании кинетики процессов твердения цемента, оценке влияния его химико-минералогических и структурных особенностей, эффекта химических добавок, параметров порообразования, льдообразования и др.

Имеется положительный опыт использования калориметрических данных в компьютерных системах и информационных технологиях бетона. Экспериментальное определение тепловыделения бетонов производится в калориметрах термосного, адиабатического или изотермического типов. Наиболее широкое распространение получили простые по устройству термосные калориметры, недостатком которых является переменный и по существу случайный температурный режим твердения образцов бетона. Для пересчета получаемых данных на изотермический режим твердения разработана расчетная методика установления т.н. эквивалентных сроков, т.е. таких сроков, в которые бетон при постоянной температуре твердения 20°C будет показывать те же величины тепловыделения, какие наблюдаются при проведении опыта в термосном калориметре. Установленная таким путем зависимость изотермического тепловыделения от времени твердения является основной характеристикой бетона для расчета температурных полей в массивных бетонных конструкциях.

В адиабатических калориметрах повышение температуры адекватно температуре в средней части крупных бетонных массивов, однако они сложны по устройству и редко используются на практике. Наиболее предпочтительными

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		47

являются калориметры изотермического типа, позволяющие поддерживать температуру бетона в процессе измерения тепловыделения на постоянном уровне.

Для приближенной расчетной оценки тепловыделения бетона предложены зависимости, учитывающие удельное тепловыделение цемента, параметры состава бетона, температуру и длительность твердения. Наиболее удобна для расчетного определения тепловыделения бетона зависимость, учитывающая удельное тепловыделение цемента.

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		48

### 3 РАСШИФРОВКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования были выбраны два портландцемента:

- ЦЕМ I 42,5Н ГОСТ 31108–2016 – портландцемент без добавок;
- ЦЕМ II/В–Ш 42,5Н ГОСТ 31108–2016 – портландцемент с добавлением шлака.

Состав цементного теста:

- 300 грамм цемента ЦЕМ I и 91.5 мл воды;
- 300 грамм цемента ЦЕМ II и 81 мл воды.

Густота цементного теста составила 5–7 мм. Приготавливались призмы 40×40×160 мм на цементном тесте ЦЕМ I и ЦЕМ II с водоцементным отношением 0,27 и 0,28 соответственно. По истечении срока образцы измельчались, подготавливались пробы и проводился рентгенофазовый и дифференциально–термический анализ. Для идентификации основных фаз применяемых цементов проводился рентгенофазовый анализ на дифрактометре ДРОН-3 с помощью программного комплекса PDWin 4.0.

Портландцемент и портландцемент с добавлением шлака являются двумя схожими по своему составу и свойствам материалами. Это обуславливает практически одинаковые сферы их применения. Однако, существуют некоторые отличия:

- ЦЕМ II в своем составе содержит шлаки. Это является первым и наиболее явной отличительной особенностью двух схожих материалов;
- Разный набор прочности в момент начала затвердевания материалов. Так, у ЦЕМ II этот процесс протекает существенно медленнее, чем у портландцемента;
- В отличие от портландцемента с добавлением шлака, портландцемент имеет преимущество в том, что он менее подвержен негативному воздействию окружающей среды, особенно если это касается температурного режима. Смесь, в которой присутствуют шлаки, при понижении температуры до отметки в 4°C застывает гораздо медленнее.
- Портландцемент имеет больший удельный вес, чем портландцемент с добавлением шлака. Следовательно, объемный его вес также больше.

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		49



– Портландцемент с добавлением шлака выигрывает у портландцемента в стоимости, которая гораздо ниже. Это связано с тем, что дорогой клинкер частично заменяется гранулированным шлаком, который является более дешевым материалом. Таким образом, количество шлака в составе цемента напрямую влияет на его стоимость – тем она ниже, чем больше содержание шлака.

### 3.1. Физико-механические характеристики

#### 3.1.1 Сроки схватывания

Экспериментальные результаты

СЕМ-1 НГ 30,5%

18:21 0мм

18:31 0мм

18:41 0мм

18:51 1мм

19:01 1мм

19:11 1мм

19:21 1мм

19:31 1мм

19:41 2мм

19:51 2мм

20:01 3мм

20:11 2мм

20:21 3мм

20:31 4мм

СЕМ-2 НГ 27%

18:33 0мм

18:43 0мм

18:53 1мм

19:03 1мм

19:13 1мм

19:23 2мм

19:33 1мм

19:43 2мм

19:53 2мм

20:03 3мм

20:13 3мм

20:23 4мм

#### 3.1.2 Тонкость помола

Экспериментальные результаты

СЕМ-1

Начальный вес 10 г.

После веса 0,04 г.

Процент равно 0,4%

СЕМ-2

Начальный вес 10 г.

После веса 0,07 г.

Процент равно 0,7%

#### 3.1.3 Прочность при сжатии

Результаты определения прочности при сжатии и изгибе приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты определения прочности при сжатии и изгибе

Вид цемента	Номер образца	Прочность при изгибе, МПа		Прочность при сжатии, МПа			
		Единичные значения, МПа	Среднее значение, МПа	Нагрузка, кН	Площадь, см <sup>2</sup>	Единичные значения, МПа	Среднее значение, МПа
ЦЕМ I 42,5 Н	1	9,45	9,2	156,2	25	62,5	61,6
				157,5	25	63,0	
	2	9,33		166,8	25	66,7	
				147,1	25	58,8	
	3	8,76		152,9	25	61,2	
				143,1	25	57,2	
ЦЕМ II 42,5	1	10,24	9,4	123,7	25	49,5	53,5
				141,8	25	56,7	
	2	8,74		129,9	25	52,0	
				133,9	25	53,6	
	3	9,2		133,2	25	53,3	
				140,5	25	56,2	

### 3.1 Микрокалориметрический анализ

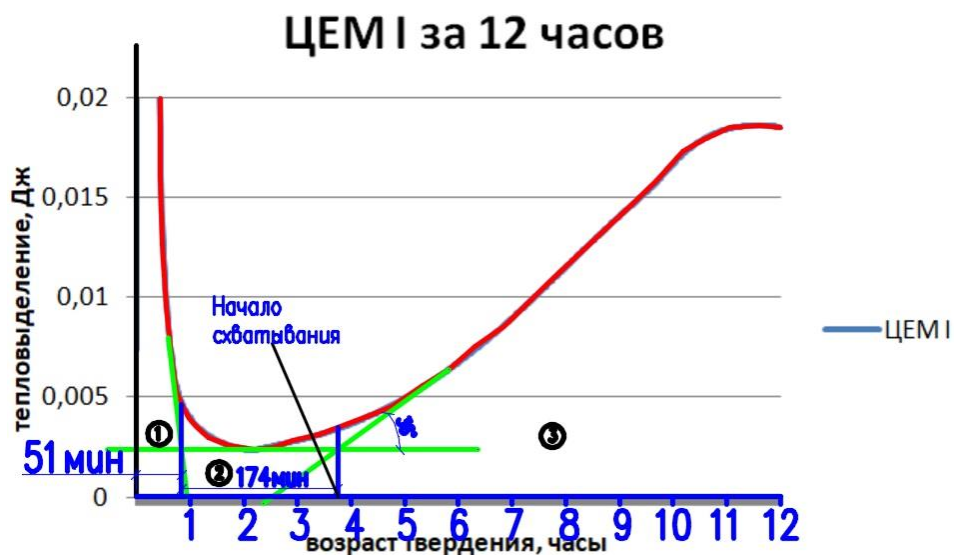


Рисунок 13 – Результаты калориметрии ЦЕМ I за 12 ч.

## ЦЕМ I за 25 суток

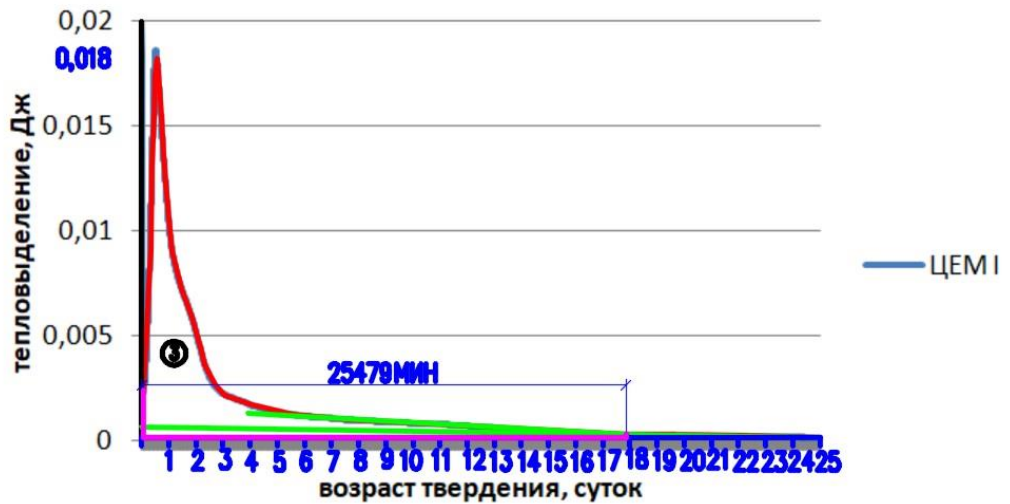


Рисунок 14 – Результаты калориметрии ЦЕМ I за 25 сут.

## ЦЕМ II за 12 часов

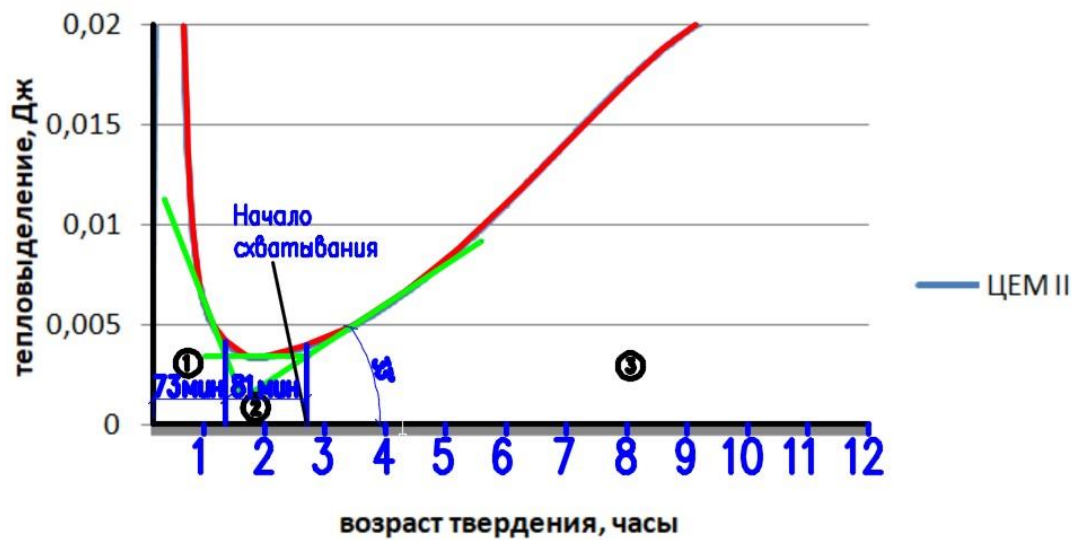


Рисунок 15 – Результаты калориметрии ЦЕМ II за 12 ч.

## ЦЕМ II за 25 суток



Рисунок 16 – Результаты калориметрии ЦЕМ II за 28 сут.

Таблица 2 – Сравнение результатов калориметрии

	Длительность 1 период, мин	Длительность 2 период, мин	Длительность 3 период, мин	Мах тепловыделение	Суммарная тепловыделение (3 период)
ЦЕМ I	51 мин	174	25479	0,018 Дж	2,83 Вт
ЦЕМ II	73	81	24163	0,022 Дж	1,79 Вт

**Вывод:** Таким образом, в ЦЕМ I суммарное тепловыделение оказалось большим, чем в ЦЕМ II. Скорость твердения ЦЕМ I выше чем состав ЦЕМ II. Это связано с тем, что в составе ЦЕМ I нет добавок. Присутствуют мелкомолотые шлаки, которые увеличивают длительность процесса твердения. Время схватывания цемента разное вследствие того, что происходит увеличение степени гидратации. Отсюда следует, что только применение тонкомолотого цемента увеличивает процесс схватывания. Большой индукционный период (2 период) связан с перенасыщением состоянием жидкой фазы цементной пасты кальцием  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  за счет его выделения при гидролизе, а его выделение приводит к замедлению. Также на скорость твердения влияют температура и влажность среды. Цемент с примесями шлака выделяет меньше тепла, что делает его применение целесообразным при строительстве массивных объектов для

предотвращения перегрева бетона. В свою очередь цемент без добавок более предпочтителен для бетонных работ, проводимых в зимнее время, так как за счет большего тепловыделения его применение позволит сократить расходы на прогрев бетонной смеси.

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		54

### 3.2 Термический анализ (дериватография)

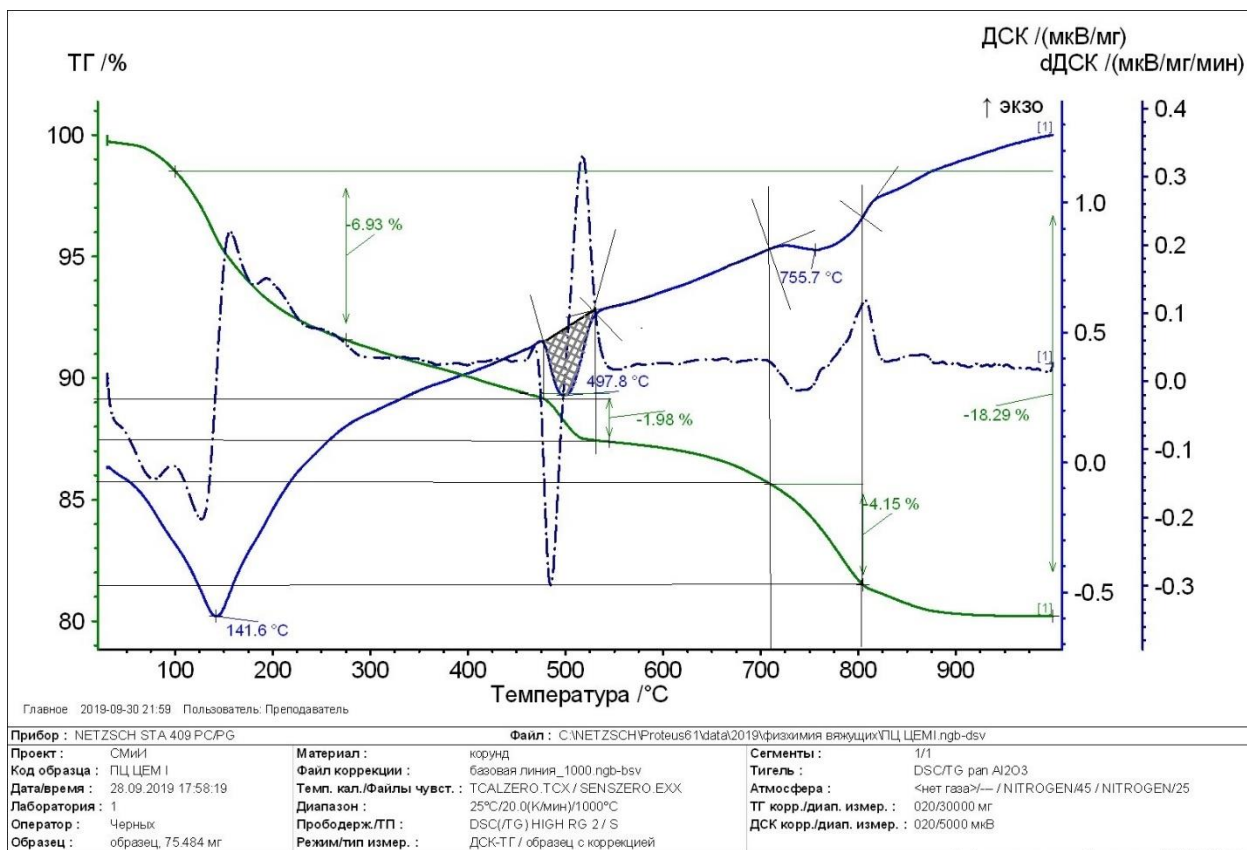


Рисунок 17 – Дериватограмма ЦЕМ I

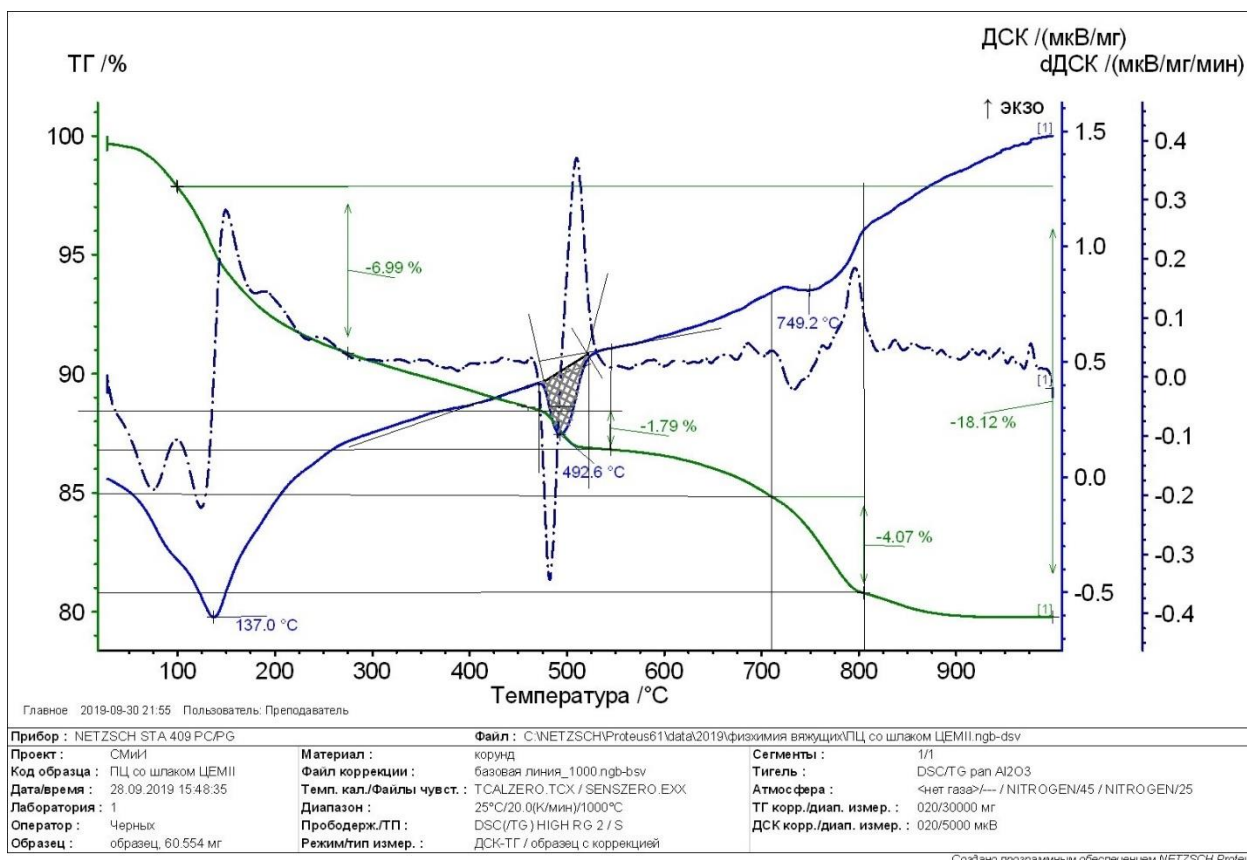


Рисунок 18 – Дериватограмма ЦЕМ II

Заключение по результатам:

– ЦЕМ I и ЦЕМ II теряли воду в диапазоне температур 480 – 525 и 720-800 °С.

– ЦЕМ I содержал 6,13 % воды

– ЦЕМ II содержал 5,86 % воды

Согласно уравнению  $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} = \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$  посчитаем содержание CSH для исходных цементов

– ЦЕМ I содержал 45,63 % CSH

– ЦЕМ II содержал 43,62 % CSH

Согласно уравнению  $\text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$

– ЦЕМ I содержал 25,2 %  $\text{Ca}(\text{OH})_2$

– ЦЕМ II содержал 24,01 %  $\text{Ca}(\text{OH})_2$

### 3.3 Рентгенофазовый анализ

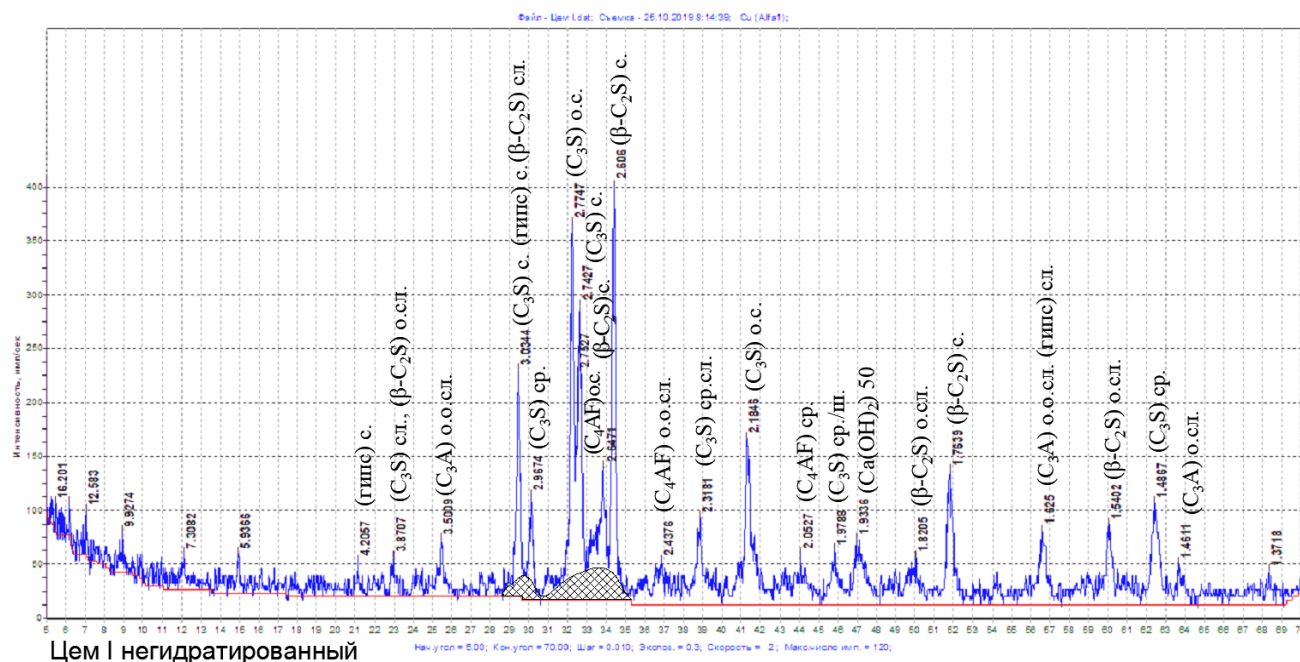


Рисунок 19 – Рентгенограмма ЦЕМ I негидратированного

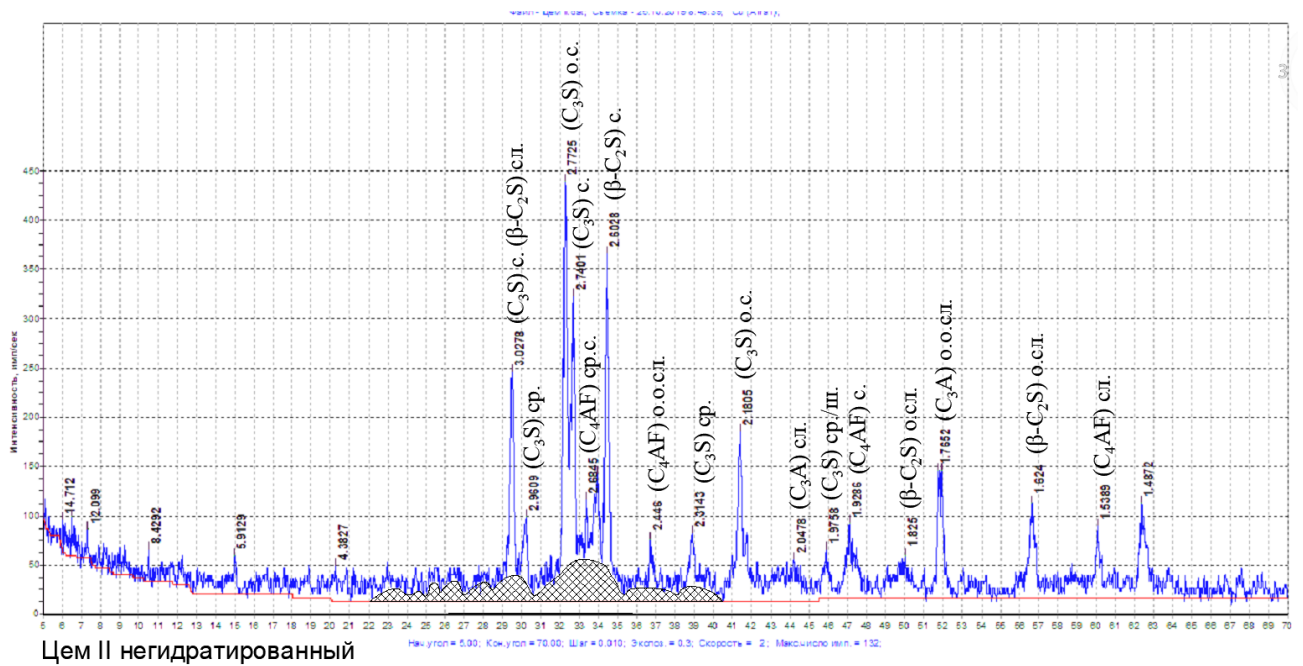


Рисунок 20 – Рентгенограмма ЦЕМ II негидратированного

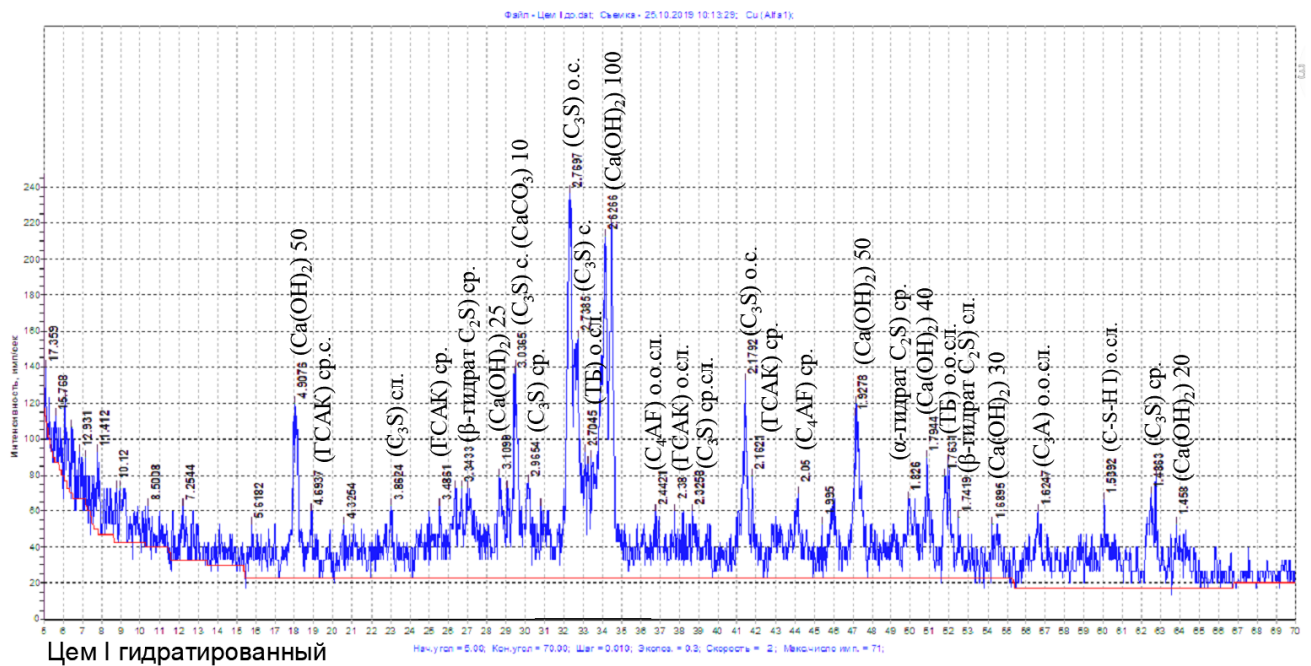


Рисунок 21 – Рентгенограмма ЦЕМ I гидратированного



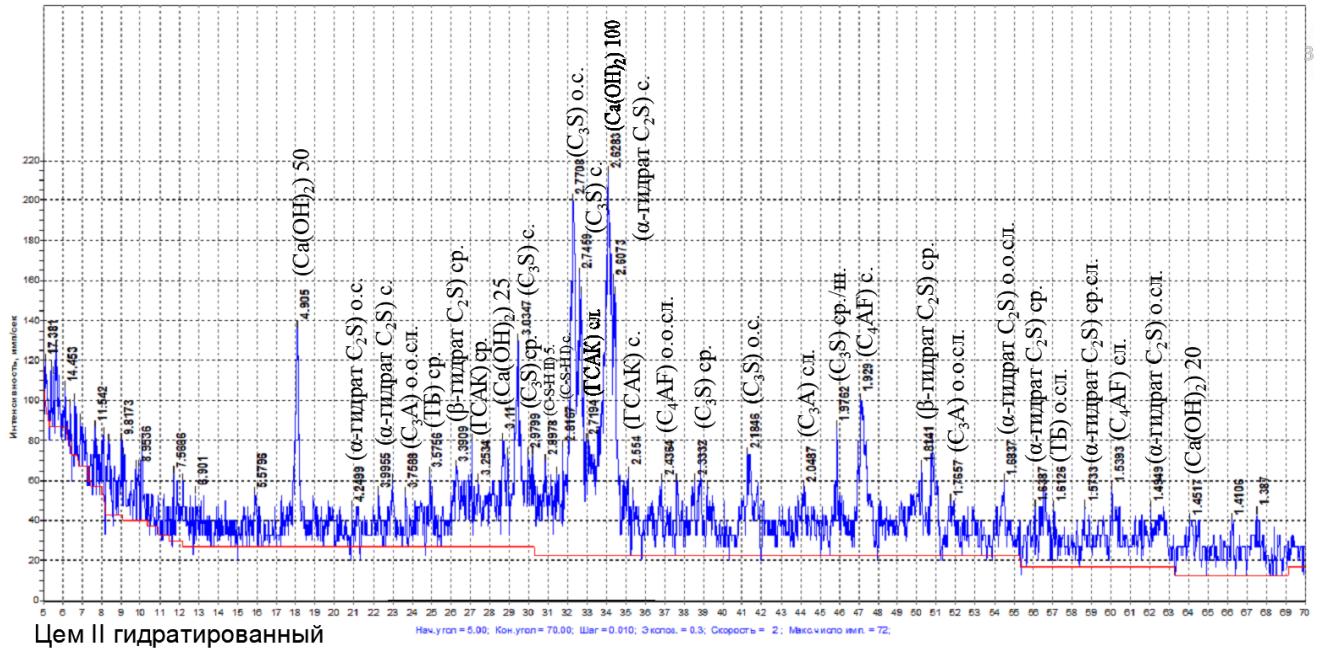


Рисунок 22 – Рентгенограмма ЦЕМ II гидратированного

Таблица 3 – C<sub>3</sub>S в ЦЕМ I

C <sub>3</sub> S	I, имп/сек		%	Степень гидратации
	негидратированный	гидратированный		
3,03	192	98	48,96	51,61%
2,77	312	177	43,27	
2,74	237	93	60,76	
2,31	67	30	55,22	
1,48	83	55	33,73	
Средний %:			48,39	

Таблица 4 – C<sub>3</sub>S в ЦЕМ II

C <sub>3</sub> S	I, имп/сек		%	Степень гидратации
	негидратированный	гидратированный		
3,03	187	115	62,61	39,87%
2,77	392	163	58,42	
2,74	233	122	47,64	
2,18	142	40	71,83	
Средний %:			60,13	

Заключение по результатам рентгенографического анализа: сравнивая площади области «Гало» у ЦЕМ II (452 усл.ед.) и ЦЕМ I (177 усл.ед.) негидратированных, можно сделать вывод, что площадь у ЦЕМ II больше на 39% и это означает, что присутствуют вещества с высокой степенью аморфности (минеральные добавки).

На рентгенограмме применяемого портландцемента ЦЕМ I видны дифракционные отражения основных минералов: алита ( $d = 3.8707, 3.0344, 2.9674, 2.7747, 2.7427, 2.3181, 2.1846, 1.4867$ ), белита ( $d = 3.8707, 2.7527, 1.8205, 1.7639, 1.5402$ ), целита ( $d = 2.6471, 2.4376, 2.0527$ ), трехкальциевого алюмината ( $d = 3.5009, 1.625, 1.4611$ ), а также гипса ( $d = 4.2057$ ).

На рентгенограмме применяемого портландцемента ЦЕМ II видны дифракционные отражения основных минералов: алита ( $d = 3.0278, 2.9609, 2.7725, 2.7401, 2.3143, 2.1805, 1.9758$ ), белита ( $d = 2.6028, 1.825, 1.624$ ), целита ( $d = 2.6845, 2.446, 1.9286, 1.5389$ ), трехкальциевого алюмината ( $d = 2.0478, 1.7652$ ).

На рентгенограмме ЦЕМ I происходило уменьшение интенсивности пиков основных минералов в связи с их гидратацией. Фазовый состав представлен (рис. 15) непрореагировавшим алитом ( $d = 3.8624, 3.0365, 2.9654, 2.7697, 2.7385, 2.3258, 2.1792, 1.4863$ ), портландитом ( $d = 4.9075, 3.1099, 2.6266, 1.9278, 1.7944, 1.6895, 1.458$ ), тоберморитом (ТБ на рентгенограмме) ( $d = 2.7045, 1.7631$ ), исчезают отражения, относящиеся к гипсу, что связано с образованием гидросульфоалюмината кальция (ГСАК) ( $d = 4.6937, 3.4861, 2.38, 2.1621$ ).

На рентгенограмме ЦЕМ II происходило уменьшение интенсивности пиков основных минералов в связи с их гидратацией. Фазовый состав представлен (рис. 16) непрореагировавшим алитом ( $d = 3.0347, 2.9799, 2.7708, 2.7459, 2.3332, 2.1846, 1.9762$ ), портландитом ( $d = 4.905, 3.11, 2.6283, 1.4517$ ), тоберморитом (ТБ на рентгенограмме) ( $d = 3.5756, 1.6126$ ), исчезают отражения, относящиеся к гипсу, что связано с образованием гидросульфоалюмината кальция (ГСАК) ( $d = 3.2534, 2.554$ ).

Таким образом, согласно данных РФА, можно сделать вывод, что ЦЕМ I прогидратировал больше, чем ЦЕМ II, сравнивая результаты по минералам  $C_3S$ .

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		59

Так же, оценивая показатели площадей области «Гало», можно сделать вывод, что присутствуют вещества с высокой степенью аморфности (минеральные добавки).

Оценивая количество минералов, которые были найдены при рентгенограмме, можно сказать, что в целом, у ЦЕМ II образовалось после гидратации их больше.

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		60

#### 4 ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТВЕРДЕНИЯ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ТВЕРДЕНИЯ ЦЕМ I и ЦЕМ II

Твердение портландцемента – процесс превращения цементного теста в камневидное тело, цементный камень. При твердении портландцемента происходит ряд сложных физико-химических процессов. Все процессы взаимодействия отдельных минералов с водой протекают одновременно, но с разной скоростью, налагаются один на другой и влияют друг на друга.

Процесс твердения портландцемента можно раз делить на три периода. Первый период – период растворения, когда минералы цемента растворяются в воде, и происходит их химическое взаимодействие с образованием гидратированных соединений, которые образуются в растворе вплоть до образования насыщенного раствора. Образование гидратов может идти и топомхимически, т.е. с прямым присоединением молекул воды.

Второй период – период коллоидации или схватывания, когда возникающие вследствие продолжающегося взаимодействия с водой новообразования не могут растворяться в уже насыщенном растворе, а выделяются в виде геля.

Третий период – период кристаллизации, или твердения, когда гелеобразные новообразования сближаются между собой, образуют кристаллы и превращаются в кристаллический сросток, что сопровождается увеличением его прочность.

Типичными реакциями, характерными для твердения портландцемента и других вяжущих веществ, являются реакции гидратации, протекающие с присоединением воды. Они могут происходить без распада основного вещества или сопровождаться его распадом на два или несколько соединений реакция гидролиза.

Трехкальциевый алюминат  $C_3A$  – самый активный клинкерный минерал, отличающийся быстрым взаимодействием с водой. При твердении в чистом виде он характеризуется низкими показателями прочности, но в сочетании с другими компонентами цементного клинкера и относительно небольшом содержании этот

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		61

минерал способствует быстрому росту прочности в первые сутки твердения цемента.

Если не ввести добавку гипса в портландцемент, то быстрое твердение  $C_3A$  вызывает раннее структурообразование в цементном тесте и сильно ускоряет сроки схватывания, получается цемент – «быстряк», бетонные смеси на котором из-за преждевременного схватывания не успевают хорошо перемешать и уложить в форму, а бетон не набирает требуемой прочности.

Четырехкальциевый алюмоферрит  $C_4AF$  – характеризуется умеренным тепловыделением и по скорости твердения занимает промежуточное положение между трехкальциевым и двухкальциевым силикатами. Прочность продуктов его гидратации в ранние сроки ниже, чем у алита, но выше, чем у белита.

Твердение образовавшихся соединений происходит с неодинаковой скоростью. Наиболее быстротвердеющими минералами являются: трехкальциевый алюминат  $C_3A$  и трехкальциевый силикат  $C_3S$ . Возникающие в процессе твердения гели трехкальциевого гидроалюмината и гидрата оксида кальция начинают кристаллизоваться и пронизывать кристаллами аморфную массу гидросиликата кальция, который длительное время остается в коллоидном состоянии. Гидросиликат кальция постепенно придает прочность твердеющему цементу, медленно уплотняясь и затвердевая.

Сравнивая показатели основных элементов структуры цементного камня, можно сделать вывод, что присутствуют непрореагировавшие минералы у ЦЕМ I и ЦЕМ II – алит, портландит и тоберморит, также образуется гидросульфалюминат кальция. Относительно крупные кристаллы  $Ca(OH)_2$  и гидросульфалюмината кальция образуют каркас цементного камня, который увеличивают его упругие свойства, жесткость. Соотношение кристаллической и гелевой составляющих определяет индивидуальные физико–механические свойства цементного камня: прочность, деформативность и другие свойства. Скорость твердения ЦЕМ I выше, чем у ЦЕМ II, так как в составе ЦЕМ I отсутствуют добавки. Добавление шлака также повлияло на степень гидратации

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		62

ЦЕМ II, в результате исследования ЦЕМ I прогидратировал больше, но после гидратации образовалось большее количество минералов именно у ЦЕМ II.

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		63

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, было проведено сравнение двух портландцементов ЦЕМ I и ЦЕМ II. По результатам термического, рентгенофазового и микрокалориметрического анализов можно сделать вывод, что скорость твердения ЦЕМ I больше, чем у ЦЕМ II, это связано с тем, что в ЦЕМ II присутствуют минеральные добавки. Так же, у ЦЕМ I показатель степени гидратации больше. Суммарное тепловыделение у ЦЕМ I оказалось большим. Цемент с примесями шлака выделяет меньше тепла, что делает его применение целесообразным при строительстве массивных объектов для предотвращения перегрева бетона. Так же, при кладке бетона не рекомендуется применение ЦЕМ I, что связано с эстетическими требованиями, так как на его поверхности появляются высолы.

В целом, ЦЕМ II обладает удлиненными сроками схватывания и умеренным тепловыделением. Этот цемент позволяет получать общестроительные бетоны и растворы для рядовых конструкций, обеспечивая рациональный расход цемента и химических добавок. В свою очередь цемент без добавок более предпочтителен для бетонных работ, проводимых в зимнее время, так как за счет большего тепловыделения его применение позволит сократить расходы на прогрев бетонной смеси.

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		64

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горшков, В.С. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ: учеб. Пособие/ В.С. Горшков, В.В. Тимашев, В.Г. Савельев – М.: Высш. школа, 1981. – 335 с.
2. Кузнецова, Т.В. Физическая химия вяжущих материалов: Учебник для хим.-технол. спец. Вузов / Т.В. Кузнецова. – М.: Высш.шк., 1989. – 384 с.
3. Методы исследования строительных материалов: методические указания к лабораторным работам / сост. Т.Ф. Пиндюк, И.Л. Чулкова. – Омск: СибАДИ, 2011. – 60 с.
4. Рамачандран, В.С. Применение дифференциального термического анализа в химии цементов / В.С. Рамачандран. – М.: Стройиздат, 1977. – 408 с.
5. Мчедлов-Петросян, О.П. Химия неорганических строительных материалов О.П. Мчедлов-Петросян. – М.: Стройиздат, 1988. – 304 с.;
6. ГОСТ 31108-2016 Цементы. Технические условия.
7. ГОСТ 10108-2012 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам.
8. ГОСТ 310.3-76 Цементы. Методы определения нормальной плотности, сроков схватывания и равномерности изменения объема (с Изменением N 1).

					08.03.01.2020.287.00.00.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		65