

Школа ИШНПТ  
 Направление подготовки 18.04.01 Химическая технология  
 Отделение школы (НОЦ) НОЦ им Н.М. Кижнера

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
<b>Исследование процесса синтеза гидрокарбонатных магниальных структур в водных условиях</b>

УДК 666.962:661.8'062.3

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ГМ93	Охлопкова Анна Владимировна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Митина Н.А.	к.т.н.		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу: «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Кащук И.В.	к.т.н.		

По разделу: «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преподаватель	Скачкова Л.А.	-		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Казьмина О.В.	Д.т.н., профессор		

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа ИШНПТ  
Направление подготовки 18.04.01 Химическая технология  
Отделение школы (НОЦ) НОЦ им Н.М. Кижнера

УТВЕРЖДАЮ:  
Руководитель ООП  
\_\_\_\_\_ Казьмина О.В.  
(Подпись) (Дата)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

\_\_\_\_\_ магистерской диссертации \_\_\_\_\_

Студенту:

Группа	ФИО
4ГМ93	Охлопкова Анна Владимировна

Тема работы:

<b>Исследование процесса синтеза гидрокарбонатных магниезальных структур в водных условиях</b>	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 50-30/с от 19.02.2020

Срок сдачи студентом выполненной работы:	07.06.2021
--	------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	Объект исследования – магниезальное вяжущее на основе порошка каустического магnezита и водного раствора бикарбоната магния в качестве затворителя. Предмет исследования – процесс синтеза гидрокарбонатных магниезальных структур при твердении гидравлического магниезального вяжущего в водных условиях.
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	Анализ литературных источников; постановка задач исследования; описание методов исследования; анализ результатов экспериментов; финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение; социальная ответственность; заключение по работе.

<b>Перечень графического материала</b>	Результаты экспериментов, рентгенофазовый и термический анализы образцов, микрофотографии.
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
1. Литературный обзор. 2. Методы исследования. 3. Экспериментальная часть.	Митина Наталия Александровна
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Кашук Ирина Вадимовна
Социальная ответственность	Скачкова Лариса Александровна
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>	
Характеристика исходных материалов и методов	

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	24.02.2020
---	------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Митина Н.А.	к.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ГМ93	Охлопкова Анна Владимировна		

**ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП «ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ  
КЕРАМИКИ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ»**

<b>Универсальные компетенции</b>	
УК(У)-1	способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действия
УК(У)-2	способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
УК(У)-3	способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия
УК(У)-5	способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК(У)-6	способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
<b>Общепрофессиональные компетенции</b>	
ОПК(У)-1	готовность к коммуникации в устной и письменной формах на русском и иностранном языках для решения задач профессиональной деятельности
ОПК(У)-2	готовность руководить коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия
ОПК(У)-3	способность к профессиональной эксплуатации современного оборудования и приборов в соответствии с направлением и профилем подготовки
ОПК(У)-4	готовность к использованию методов математического моделирования материалов и технологических процессов, к теоретическому анализу и экспериментальной проверке теоретических гипотез
ОПК(У)-5	готовность к защите объектов интеллектуальной собственности и коммерциализации прав на объекты интеллектуальной собственности
<b>Профессиональные компетенции</b>	
ПК(У)-1	способность организовывать самостоятельную и коллективную научно-исследовательскую работу, разрабатывать планы и программы проведения научных исследований и технических разработок, разрабатывать задания для исполнителей
ПК(У)-2	готовность к поиску, обработке, анализу и систематизации научно-технической информации по теме исследования, выбору методик и средств решения задачи
ПК(У)-3	способность использовать современные приборы и методики, организовывать проведение экспериментов и испытаний, проводить их обработку и анализировать их результаты
<b>Профессиональные компетенции университета</b>	
ДПК(У)-1	готовность к разработке учебно-методическую документацию для реализации образовательных программ

**Министерство науки и высшего образования и Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа ИШНПТ  
Направление подготовки 18.04.01 Химическая технология  
Отделение школы (НОЦ) НОЦ им Н.М. Кижнера  
Период выполнения (осенний / весенний семестр 2020/2021 учебного года)

Форма представления работы:

Магистерская диссертация  
(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН  
выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы: 07.06.2021

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
07.06.2021	Основная часть	75
	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	15
	Социальная ответственность	10

**СОСТАВИЛ:**

**Руководитель ВКР**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Митина Н.А.	к.т.н.		

**СОГЛАСОВАНО:**

**Руководитель ООП**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Казьмина О.В.	д.т.н, профессор		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 108 с., 21 рис., 31 табл., 52 источника, 1 прил.

Ключевые слова: магнезиальное вяжущее; гидратация; твердение в воде; водостойкость; каустический магнезит; бикарбонат магния.

Объектом исследования является магнезиальное вяжущее на основе порошка каустического магнезита и водного раствора бикарбоната магния в качестве затворителя.

Цель работы – исследование процесса синтеза гидрокарбонатных магнезиальных структур при твердении гидравлического магнезиального вяжущего в водных условиях.

В процессе исследования проводились: приготовление гидравлического магнезиального вяжущего, определение характеристик среды и изучение изменений структуры и фазового состава магнезиального вяжущего во время твердения образцов в воде.

В результате исследования: установлено влияние водной среды и типа системы (открытой и закрытой) на процессы гидратации и твердения магнезиального вяжущего.

Степень внедрения: лабораторные испытания.

Область применения: строительство.

Экономическая эффективность/значимость работы: в результате проведения анализа экономической эффективности выявлено, что данное исследование по сравнению с аналогом более ресурсоэффективно.

В будущем планируется: исследование твердения гидравлического магнезиального вяжущего в жидкостях различного состава.

## ПЕРЕЧЕНЬ СТАНДАРТОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ОФОРМЛЕНИИ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

1. ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
2. ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.
3. ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
4. ГОСТ 12.1.007-76 ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности.
5. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.
6. ГОСТ 12.2.003-91 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности.
7. ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.
8. ГОСТ 1216-87 ТУ. Порошки магниезиальные каустические.

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ПМК-75 – порошок магнезиальный каустический с содержанием оксида магния не менее 75 %;

БКМ – бикарбонат магния;

РФА – рентгенофазовый анализ;

ДСК – дифференциально-сканирующая калориметрия;

ДТА – дифференциально-термический анализ;

ТГ – термогравиметрия;

ПДК – предельно допустимая концентрация;

ЧС – чрезвычайная ситуация.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	13
1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.....	14
1.1 Магнезиальные вяжущие вещества.....	14
1.2 Гидратация магнезиальных вяжущих.....	15
1.2.1 Гидратация магнезиального оксихлоридного цемента.....	15
1.2.2 Гидратация магнезиального оксисульфатного цемента.....	19
1.3 Водостойкие магнезиальные композиции.....	20
1.3.1 Неорганические добавки.....	21
1.3.2 Органические добавки.....	22
1.3.3 Минеральные добавки.....	23
1.3.4 Карбонизация магнезиального цемента.....	24
1.3.5 Затворение раствором бикарбоната магния.....	25
1.4 Твердение магнезиального гидрокарбонатного цемента в воде.....	26
1.5 Фазообразование и изменение фаз в системе MgO-CO <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O.....	28
1.6 Предпосылки исследований.....	31
2 ХАРАКТЕРИСТИКА ИСХОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДОВ.....	33
2.1 Характеристика исходных материалов.....	33
2.1.1 Каустический магнезит.....	33
2.1.2 Раствор бикарбоната магния.....	35
2.2 Методы исследований.....	36
2.2.1 Постановка эксперимента.....	36
2.2.2 Определение концентраций ионов CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> и HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> .....	37

2.2.3	Измерение рН среды.....	38
2.2.4	Определение предела прочности на сжатие.....	39
2.2.5	Определение объемного фазового состава.....	39
2.2.6	Определение истинной плотности .....	42
2.2.7	Рентгенофазовый анализ .....	42
2.2.8	Термический анализ.....	43
2.2.9	Масс-спектрометрия .....	44
2.2.10	Электронная микроскопия .....	44
3	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.....	45
3.1	Измерение рН среды.....	45
3.2	Измерение концентраций ионов $\text{CO}_3^{2-}$ и $\text{HCO}_3^-$ в среде твердения .....	47
3.3	Измерение прочности образцов.....	50
3.4	Определение объемного фазового состава.....	52
3.5	Рентгенофазовый анализ .....	54
3.6	Термический анализ.....	56
3.7	Масс-спектрометрия .....	59
3.8	Электронная микроскопия .....	60
4	ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ .....	63
4.1	Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения .....	64
4.1.1	Анализ конкурентных технических решений.....	64
4.1.2	SWOT-анализ.....	65
4.2	Планирование научно-исследовательских работ .....	69

4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования .....	69
4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения .....	70
4.3 Бюджет научно-технического исследования .....	73
4.3.1 Расчет материальных затрат научно-технического исследования .....	74
4.3.2 Расчет амортизации специального оборудования .....	75
4.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы .....	76
4.3.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы .....	77
4.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды .....	77
4.3.6 Накладные расходы .....	78
4.3.7 Бюджетная стоимость НИР .....	78
4.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования .....	79
4.4.1 Интегральный показатель финансовой эффективности .....	80
4.4.2 Интегральный показатель ресурсоэффективности .....	80
4.4.3 Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки .....	81
5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ .....	86
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	87
5.1.1 Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства .....	87
5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя .....	88
5.2 Производственная безопасность .....	89
5.2.1 Анализ вредных и опасных производственных факторов .....	90

5.2.2 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов.....	96
5.3 Экологическая безопасность.....	96
5.3.1 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду .....	96
5.3.2 Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду .....	97
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	98
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	101
СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СТУДЕНТА.....	103
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	104
Приложение А .....	109

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ученые всего мира работают над новыми технологиями, призванными уменьшить негативное антропогенное влияние на окружающую среду. Прежде всего требуют модернизации крупнотоннажные производства, одним из которых является технология цемента.

Мировое производство портландцемента, важного строительного материала, составляет более 4 миллиардов тонн в год [1], и сопровождается значительными ресурсными и энергетическими затратами. Около 5-7 % глобальных антропогенных выбросов  $\text{CO}_2$  [2-5] и 3 % от общего потребления энергии в мире [2] связано с работой цементной промышленности.

В современных условиях научное сообщество выделяет в качестве перспективной альтернативы портландцементу материалы на основе магнезиальных вяжущих [5], благодаря их уникальному ряду свойств и более низким расходам энергии и топлива при производстве. Сдерживающим фактором развития технологии магнезиальных вяжущих является их низкая водостойкость из-за синтеза растворимых фаз во время твердения.

Замена традиционной жидкости затворения на раствор бикарбоната магния позволяет получить гидравлические магнезиальные вяжущие, способные твердеть как на воздухе, так и в воде [6]. Однако недостаточно изучен сам процесс твердения в воде.

Целью данной работы является исследование процесса синтеза гидрокарбонатных магнезиальных структур при твердении гидравлического магнезиального вяжущего в водных условиях.

Объект исследования – магнезиальное вяжущее на основе порошка каустического магнезита и водного раствора бикарбоната магния в качестве затворителя.

Предмет исследования – процесс синтеза гидрокарбонатных магнезиальных структур при твердении гидравлического магнезиального вяжущего в водных условиях.

# 1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

## 1.1 Магнезиальные вяжущие вещества

Магнезиальные вяжущие вещества – это материалы, получаемые затворением тонкомолотого порошка каустического магнезита растворами различных солей. Наиболее известны магнезиальные оксихлоридные и оксисульфатные цементы, которые получают затворением порошка  $MgO$  концентрированным раствором хлорида магния  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$  и раствором сульфата магния  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$  соответственно.

Магнезиальные цементы быстро схватываются и набирают прочность в начале твердения, обладают высокой износостойкостью, термостойкостью и низкой теплопроводностью, а также низкой щелочностью и отличной адгезионной способностью, что позволяет использовать вместе с магнезиальными цементами широкий ряд наполнителей.

В настоящее время интерес к магнезиальным вяжущим у ученых вызван их более экологически безопасным и менее ресурсо- и энергозатратным процессом получения, чем производство широко используемого портландцемента.

На производство портландцемента и его различных модификаций приходится около 3 % от общего потребления энергии в мире и 15 % от потребления энергии в мировой промышленности [2], а также около 5-7 % глобальных антропогенных выбросов парниковых газов [2-5].

Обжиг магнезита требует более низких температур (до 800 °С) [7], чем обжиг сырьевой смеси при получении клинкера для портландцемента (до 1450 °С). Соответственно, ниже расход топлива на обжиг и связанные с данным процессом затраты электроэнергии.

Немаловажным, с экологической точки зрения, аспектом является способность магнезиальных цементов поглощать  $CO_2$  из окружающей атмосферы, образуя слой прочных карбонатов и гидроксикарбонатов магния на

поверхности изделия. Анализ полного цикла производства и эксплуатации магнезиального вяжущего показал [5], что общее выделение  $\text{CO}_2$ , с учетом его поглощения, ниже на 73 %, чем при аналогичном цикле портландцемента.

Однако развитие технологии магнезиальных вяжущих ограничивается их низкой водостойкостью и высокой гигроскопичностью. Условием для применения магнезиальных цементов является отсутствие контакта с водой и влажным воздухом. В настоящее время материалы на основе магнезиальных вяжущих занимают узкую область на рынке строительных материалов и используются для литья полов, изготовления плит и блоков для внутренней отделки и теплоизоляции помещений, получения искусственного мрамора, изготовления лепнины и других декоративных изделий.

## 1.2 Гидратация магнезиальных вяжущих

### 1.2.1 Гидратация магнезиального оксихлоридного цемента

Основными фазами в магнезиальном оксихлоридном цементе при нормальных условиях твердения являются  $\text{MgO}$ , брусит  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  и гидрооксихлориды магния  $3\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ,  $5\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ . Фазовая диаграмма системы  $\text{MgO}-\text{MgCl}_2-\text{H}_2\text{O}$  при температуре 23 °C [8,9] представлена на рисунке 1.

Теоретические реакции взаимодействия магнезиального вяжущего с раствором хлорида магния [8-11]:



Игольчатые кристаллы  $3\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  и  $5\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  прорастают, соединяясь и переплетаясь друг с другом, и образуют прочную плотную структуру.

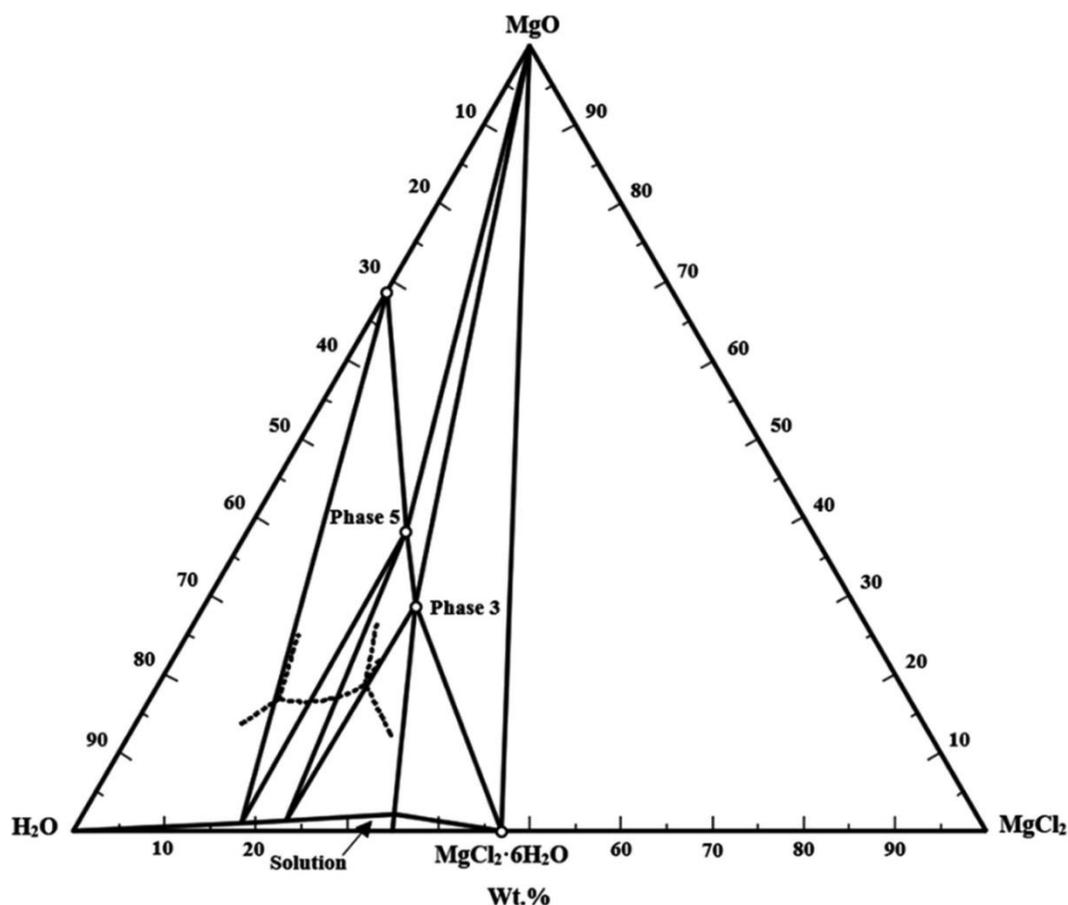
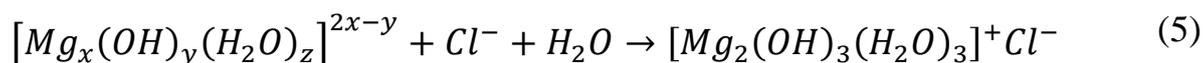
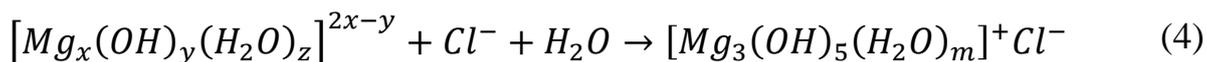
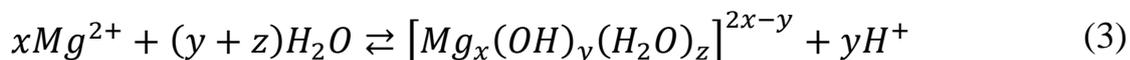


Рисунок 1 – Фазовая диаграмма системы MgO-MgCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O при температуре 23 °C [8,9]

(Phase 3 – 3Mg(OH)<sub>2</sub>·MgCl<sub>2</sub>·8H<sub>2</sub>O, Phase 5 – 5Mg(OH)<sub>2</sub>·MgCl<sub>2</sub>·8H<sub>2</sub>O)

Сам процесс гидратации чрезвычайно сложен. Ученые утверждают [9], что синтез гидроксихлоридов магния идет через образование комплексных ионов  $[Mg_x(OH)_y(H_2O)_z]^{2x-y}$ . Эти комплексные ионы взаимодействуют с ионами Cl<sup>-</sup> и молекулами H<sub>2</sub>O, образуя гель, который далее кристаллизуется в гидроксихлориды магния:



Гидроксихлориды магния, которые определяют прочность магниального оксихлоридного цемента, также являются причиной его низкой

водостойкости. Тригидроксихлорид и пентагидроксихлорид магния легко разрушаются при воздействии воды, образуя гидроксид магния  $Mg(OH)_2$  [9]:



Формирование фаз и их соотношение в магнезиальном оксихлоридном цементе зависит от активности магнезиального вяжущего, молярных отношений  $MgO/MgCl_2$  и  $H_2O/MgCl_2$ , добавок и условий твердения. Последние исследования [11,13] показывают, что для получения прочного цемента и содержания в фазовом составе преимущественно  $5Mg(OH)_2 \cdot MgCl_2 \cdot 8H_2O$  необходимы высокие молярные отношения – около 11-17 для  $MgO/MgCl_2$  и 12-18 для  $H_2O/MgCl_2$ . При температурах выше 100 °С стабильны другие продукты гидратации [9,10]:  $2Mg(OH)_2 \cdot MgCl_2 \cdot 2H_2O$ ,  $2Mg(OH)_2 \cdot MgCl_2 \cdot 4H_2O$ ,  $9Mg(OH)_2 \cdot MgCl_2 \cdot 4H_2O$ . Также из-за способности магнезиальных цементов поглощать из окружающей атмосферы  $CO_2$  могут образоваться карбонатные соединения, например, хлорартинит  $Mg_2(CO_3)Cl(OH) \cdot 3H_2O$ . Наиболее часто встречающиеся фазы в магнезиальном оксихлоридном цементе при разных температурах твердения [10] приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Строение и стабильность некоторых фаз магниального оксихлоридного цемента [10]

Фаза	Строение	Стабильность
$3\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	Двойные цепочки октаэдров $\text{MgO}_6$ , окруженные ионами/атомами $\text{Cl}$ и молекулами $\text{H}_2\text{O}$	Стабильны при низких температурах (до $100^\circ\text{C}$ )
$5\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	Тройные цепочки октаэдров $\text{MgO}_6$ , окруженные ионами/атомами $\text{Cl}$ и молекулами $\text{H}_2\text{O}$	Образуется при низких температурах (до $100^\circ\text{C}$ ), не стабилен, переходит в фазу $3\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
$\text{Mg}_2(\text{CO}_3)\text{Cl}(\text{OH}) \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	Октаэдры $\text{MgO}_6$ , соединенные атомами $\text{C}$ в кольца и окруженные ионами/атомами $\text{Cl}$ и молекулами $\text{H}_2\text{O}$	Образуется при низких температурах (до $100^\circ\text{C}$ )
$2\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Тройные цепочки искаженных октаэдров $\text{MgO}_6$ , окруженные ионами/атомами $\text{Cl}$ и молекулами $\text{H}_2\text{O}$	Стабильны при высоких температурах (более $100^\circ\text{C}$ )
$2\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Двойные цепочки октаэдров $\text{MgO}_6$ , связанные одинарными цепочками октаэдров $\text{MgO}_6$ , и окруженные ионами/атомами $\text{Cl}$ и молекулами $\text{H}_2\text{O}$	Стабильны при высоких температурах (более $100^\circ\text{C}$ )
$9\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Тройные цепочки октаэдров $\text{MgO}_6$ , связанные двойными цепочками октаэдров $\text{MgO}_6$ , и окруженные ионами/атомами $\text{Cl}$ и молекулами $\text{H}_2\text{O}$	Стабильны при высоких температурах (более $100^\circ\text{C}$ )

## 1.2.2 Гидратация магнезиального оксисульфатного цемента

При взаимодействии магнезиального вяжущего с раствором сульфата магния при комнатной температуре образуются брусит  $Mg(OH)_2$  и гидрооксисульфаты магния  $3Mg(OH)_2 \cdot MgSO_4 \cdot 8H_2O$  и  $5Mg(OH)_2 \cdot MgSO_4 \cdot 2H_2O$  [8, 14-16]:



Помимо вышеуказанных фаз в зависимости от условий возможно образование других гидрооксисульфатов магния [8]:  $Mg(OH)_2 \cdot MgSO_4 \cdot 5H_2O$ ,  $Mg(OH)_2 \cdot 2MgSO_4 \cdot 3H_2O$ ,  $5Mg(OH)_2 \cdot MgSO_4 \cdot 7H_2O$ .

Механизм гидратации магнезиального оксисульфатного цемента менее изучен. Исследователи [17] предположили, что синтез гидрооксисульфатов магния идет также через растворение, адсорбцию и ионный обмен с образованием промежуточных комплексных ионов  $[Mg(OH)(H_2O)_x]^+$ , которые затем реагируют с  $OH^-$  и  $SO_4^{2-}$ .

Фаза  $3Mg(OH)_2 \cdot MgSO_4 \cdot 8H_2O$ , наряду с бруситом  $Mg(OH)_2$ , является основным продуктом гидратации в магнезиальном оксисульфатном цементе при температурах ниже  $50^\circ C$  [15]. Однако пластинчатое строение кристаллов фазы  $3Mg(OH)_2 \cdot MgSO_4 \cdot 8H_2O$  обуславливает более низкую прочность магнезиального оксисульфатного цемента по сравнению с оксихлоридным. Более предпочтительной в этом плане является фаза  $5Mg(OH)_2 \cdot MgSO_4 \cdot xH_2O$ , которая имеет игольчатое строение кристаллов и образуется преимущественно при гидротермальном твердении цемента при температурах  $50-120^\circ C$  [8].

Также на формирование фазы  $5Mg(OH)_2 \cdot MgSO_4 \cdot xH_2O$  существенно влияют молярные отношения  $MgO/MgSO_4$  и  $H_2O/MgSO_4$  в смеси. Для получения прочного изделия необходимо высокое молярное отношение  $MgO/MgSO_4$  (выше 5, около 10-12) [14,16], что приводит к большому количеству непрореагировавшего  $MgO$  в составе цемента. Несмотря на то, что гидрооксисульфаты магния считаются более стабильными в воде, чем

гидрооксихлориды магния, магнезиальный оксисульфатный цемент также обладает низкой водостойкостью из-за высокого содержания остаточного MgO. В дальних сроках твердения гидратация MgO с образованием Mg(OH)<sub>2</sub>, которая сопровождается неравномерным изменением объема, может привести к появлению трещин и разрушению изделия.

В таблице 2 приведено строение фаз магнезиального оксисульфатного цемента [18].

Таблица 2 – Строение и стабильность некоторых фаз магнезиального оксисульфатного цемента [18]

Фаза	Строение	Стабильность
$3\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	Перекрещивающиеся двойные цепочки октаэдров MgO <sub>6</sub> , окруженные тетраэдрами SO <sub>4</sub> и молекулами H <sub>2</sub> O	Образуется при низких температурах (до 50 °С), метастабилен
$5\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Октаэдры MgO <sub>6</sub> , соединенные тетраэдрами SO <sub>4</sub> в параллельные цепи, и окруженные молекулами H <sub>2</sub> O	Образуется при температурах 50-120 °С, стабильность спорна
$5\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	Тройные цепочки октаэдров MgO <sub>6</sub> , разделенные цепочками тетраэдров SO <sub>4</sub> , и окруженные молекулами H <sub>2</sub> O	Мало изучена

### 1.3 Водостойкие магнезиальные композиции

Основным ограничением применения магнезиальных вяжущих является их низкая водостойкость. Во влажных условиях фазы магнезиального оксихлоридного и оксисульфатного цемента распадаются с образованием Mg(OH)<sub>2</sub> и растворимых хлоридов или сульфатов магния, что приводит к

значительной потере прочности. Растворимость основных гидроксихлоридов и гидроксисульфатов магния при 25 °С (на 100 г воды) [18]:

- $3\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  – 80,2 г,
- $5\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  – 58,1 г,
- $3\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  – 42,2 г.

При нахождении в воде в течение 28 суток образцов из магниезальных оксихлоридных и оксисульфатных цементов их прочность на сжатие снижается на 80-90 % [9, 18].

За последние десятилетия было предложено множество способов получения водостойких магниезальных композиций. Большинство из них предполагает использование различных органических, неорганических и минеральных добавок, которые направлены на защиту от воды продуктов гидратации и связывание непрореагировавшего MgO.

### 1.3.1 Неорганические добавки

К неорганическим добавкам, повышающим водостойкость магниезального цемента, относят [18-21]:

- ортофосфорная кислота  $\text{H}_3\text{PO}_4$  и фосфаты  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ ,  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ;
- хлориды  $\text{KCl}$ ,  $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{ZnCl}_2$ ,  $\text{CaCl}_2$ ;
- сульфаты  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{ZnSO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  и др.

Наибольшую эффективность среди них имеют фосфорная кислота  $\text{H}_3\text{PO}_4$  и её соли ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ ,  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ) [18-21]. При введении фосфорной кислоты или дигидрофосфата калия в количестве 1 % мас. уменьшается содержание остаточного MgO, образуется больше гелевидной фазы  $5\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  в магниезальном оксихлоридном цементе, повышается коэффициент размягчения в воде до 0,8, но при этом идет потеря прочности [19, 21]. Механизм повышения водостойкости заключается в том, что фосфорная

кислота и растворимые соли дают фосфат-ионы, которые взаимодействуют с ионами  $Mg^{2+}$  и комплексными ионами  $[Mg_x(OH)_y(H_2O)_z]^{2x-y}$ , образуя нерастворимые гидрофосфаты  $Mg_3(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$  и  $Mg_3(PO_4)_2 \cdot 10H_2O$ , и влияют на фазовые превращения в системе твердения.

### 1.3.2 Органические добавки

Последние исследования по повышению водостойкости магнезиальных вяжущих больше посвящены изучению влияния новых органических добавок, чем неорганических. К ним относятся [17-19, 22-25]:

- кислоты (лимонная  $C_6H_8O_7$ , винная  $C_4H_6O_6$ , гликолевая  $C_2H_4O_3$ );
- полимеры (этиленвинилацетат  $C_6H_{10}O_2$  (ЭВА), акрилаты);
- эфиры (тетраэтоксисилан  $(C_2H_5O)_4Si$ );
- соли (цитрат натрия  $Na_3C_6H_5O_7$ , глюконат натрия  $C_6H_{11}NaO_7$ , ацетат натрия  $C_2H_3O_2Na$ ) и др.

Введение органических добавок обычно ведет к повышению гидрофобности цементных частиц, подавляя процессы гидролиза, снижению пористости цементного камня, затрудняя доступ воды в матрицу, и повышению водостойкости.

Из перечисленных органических добавок выделяются лимонная кислота и её натриевая соль, которые значительно повышают водостойкость магнезиального оксисульфатного цемента до 0,8 [24] и магнезиального оксихлоридного цемента до 0,9 [17].

Лимонная кислота и цитрат натрия [17] образуют сложные комплексообразующие лиганды  $H_{cit}$ , которые взаимодействуют с ионами  $[Mg(OH)(H_2O)_x]^+$  с образованием стабильного комплекса  $[Mg_3(OH)_{10-x}(H_{cit})(H_2O)_x]^+$ . Этот комплекс ограничивает образование  $Mg(OH)_2$  и способствует синтезу нерастворимой фазы  $5Mg(OH)_2 \cdot MgSO_4 \cdot 7H_2O$  в магнезиальном оксисульфатном цементе и фазы  $5Mg(OH)_2 \cdot MgCl_2 \cdot 8H_2O$  в магнезиальном оксихлоридном цементе.

### 1.3.3 Минеральные добавки

К минеральным добавкам магнезиальных цементов обычно относят природные минералы и отходы промышленности [8, 26-33]:

- глинистые минералы и цеолиты,
- гидрокарбонаты магния,
- отходы, содержащие активный  $\text{SiO}_2$  (зола-унос, измельченный доменный шлак, порошок кварцевого стекла, зола сожженного сточного ила, отходы от обработки риса) и др.

Использование таких добавок в определенных количествах в составе магнезиальных цементов улучшает эксплуатационные свойства, заодно снижая их стоимость в отличие от химически чистых добавок. Однако непостоянный и сложный состав минеральных добавок, особенно промышленных отходов, усложняет изучение механизма происходящих в цементе процессов и прогнозирование свойств получаемого изделия.

Введение золы-уноса в количестве 30 % от массы  $\text{MgO}$  повышает водостойкость магнезиального оксихлоридного цемента до 0,7 [28] и магнезиального оксисульфатного цемента до 0,8 [33]. Вместе с увеличением количества добавки золы-уноса от 10 до 30 % улучшается технологичность смеси, удлиняются сроки схватывания, но в тоже время снижается прочность на сжатие. Похожие результаты были получены при изучении влияния других добавок-отходов с  $\text{SiO}_2$  [29-33]. Предполагается, что такие добавки приводят к образованию большого количества нерастворимой гелеобразной фазы из продуктов гидратации и  $\text{SiO}_2$ , что снижает количество непрореагировавшего  $\text{MgO}$ , уплотняет матрицу, и тем самым, повышает водостойкость цемента.

Относительно новым и менее изученным способом повышения водостойкости магнезиальных вяжущих является применение гидрокарбонатов магния в качестве добавок [26, 27]. Исследователями [26] было выявлено, что введение гидромагнезита  $4\text{MgCO}_3 \cdot \text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  в состав смеси до 10 % мас.

повышает водостойкость магнезиального цемента до 0,9, а также улучшает прочностные свойства. Кристаллическая структура гидромагнезита сложена из октаэдров  $MgO_6$ , как и гидрооксихлориды и гидрооксисульфаты магния (Таблицы 1, 2), что способствует формированию и развитию кристаллов продуктов гидратации. Гидромагнезит способен вступать в реакцию с  $MgO$ , образуя нерастворимые и прочные гидрокарбонаты магния, и снижает количество остаточного  $MgO$  в магнезиальном цементе. В этом отличие гидромагнезита от других добавок, т.к. он повышает водостойкость магнезиального цемента без потери прочности.

#### 1.3.4 Карбонизация магнезиального цемента

В последние годы активно обсуждается карбонизация магнезиального цемента [10, 28, 33-36], как способ улучшения свойств материала и снижения выбросов  $CO_2$ .

В работах [28, 33, 36] карбонизацию образцов и изделий из магнезиального цемента, после предварительного твердения в воздухе, проводят в камере при 20 % концентрации  $CO_2$  в среде, высокой относительной влажности (70-90 %) и невысоких температурах 20-30 °С.

При карбонизации магнезиального цемента во время твердения идет образование гидрокарбонатных соединений магния [35]: несквегонит  $MgCO_3 \cdot 3H_2O$ , дипингит  $4MgCO_3 \cdot Mg(OH)_2 \cdot 5H_2O$ , гидромагнезит  $4MgCO_3 \cdot Mg(OH)_2 \cdot 4H_2O$ , артинит  $MgCO_3 \cdot Mg(OH)_2 \cdot 3H_2O$ . Получаемые аморфные и кристаллические фазы гидрокарбонатов магния заполняют поры в магнезиальном цементе, уплотняя и упрочняя структуру, и затрудняют проникновение воды в объем. Повышение водостойкости магнезиального цемента при этом небольшое – до 0,4-0,5, но значительно увеличиваются прочностные свойства. Совместное использование карбонизации и таких добавок, как зола-унос, порошок кварцевого стекла или измельченные доменные шлаки [28, 33], позволяет получить прочные и водостойкие магнезиальные

композиции. Однако данная технология рассчитана только на получение сборно-блочных изделий, т.к. требует предварительного твердения и карбонизации в камерах в местах производства.

### 1.3.5 Затворение раствором бикарбоната магния

В приведенных выше работах замечается общий недостаток применения добавок – повышение водостойкости идет с понижением прочности по сравнению с магнезиальным цементом без модификаторов. Карбонизация магнезиального цемента усложняет технологию и повышает стоимость изделий. Также в данных способах связывается и защищается от влаги лишь часть водорастворимых соединений магнезиального оксихлоридного и окисульфатного цемента, что ограничивает срок службы материалов во влажных условиях. Длительное воздействие влаги на изделия таких составов приведет к растворению незащищенных фаз и разрушению изделия.

Учеными ТПУ [6] был предложен новый способ получения водостойких магнезиальных композиций – замена традиционных жидкостей затворения, растворов хлорида магния  $MgCl_2$  и сульфата магния  $MgSO_4$ , на водный раствор бикарбоната магния  $Mg(HCO_3)_2$ . Затворение раствором бикарбоната магния позволяет исключить образование растворимых соединений и получить нерастворимые прочные кристаллические фазы гидратных соединений магния. В результате был получен гидравлический гидрокарбонатный магнезиальный цемент, способный твердеть, как на воздухе, так и в воде.

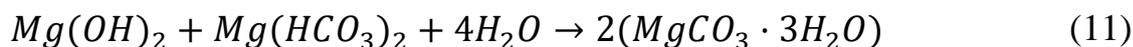
Предыдущее исследование [38] показало, что образцы полученные затворением порошка каустического магнезита раствором бикарбоната магния имеют коэффициент гидратационного твердения равный 1,2, что свидетельствует о гидравлических свойствах магнезиального цемента данного состава.

#### 1.4 Твердение магниального гидрокарбонатного цемента в воде

При затворении водным раствором бикарбоната магния  $Mg(HCO_3)_2$  порошка каустического магнезита образуется цементная система, способная набирать прочность в воде и во влажных условиях. Выявлено [38], что прочность образцов магниального гидрокарбонатного цемента, твердевших в воде, выше, чем при твердении на воздухе. Это происходит из-за того, что синтез основных фаз цемента, гидратированных карбонатных фаз, протекает через гидратацию  $MgO$  и образование брусита  $Mg(OH)_2$  [6, 38]:



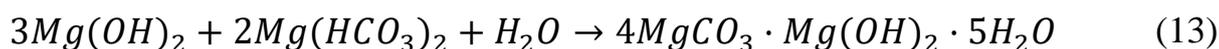
Теоретические реакции образования гидрокарбонатов и гидратгидрокарбонатов магния при взаимодействии брусита  $Mg(OH)_2$  с раствором бикарбоната магния:



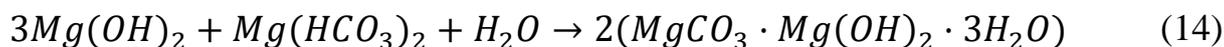
несквегонит



гидромагнезит



дипингит



артинит

В сухих условиях твердения конверсия  $MgO$  в  $Mg(OH)_2$  протекает медленно, следовательно ниже интенсивность образования гидрокарбонатов и гидратгидрокарбонатов магния. При твердении на воздухе количество продуктов гидратации магниального гидрокарбонатного цемента, определяющих его прочность, будет меньше, чем при твердении в воде.

На рисунке 2 [6] показано сравнение потерь массы при термическом разложении продуктов гидратации магнезиального гидрокарбонатного цемента, твердевшего в разных условиях.

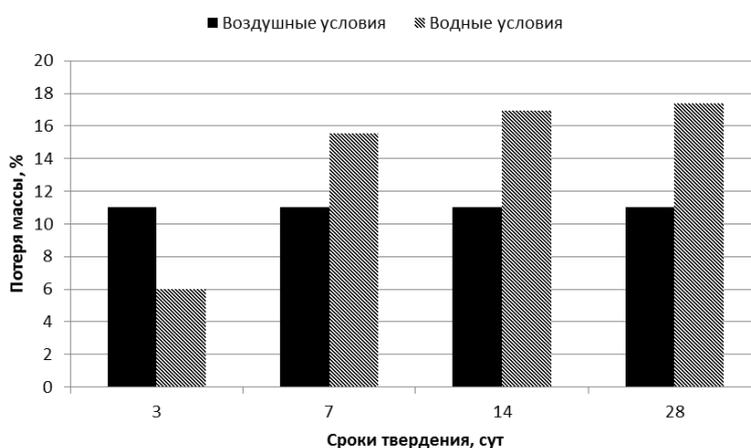
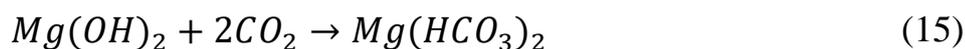


Рисунок 2 – Зависимость потери массы продуктов твердения при нагревании от условий и сроков твердения в интервале температур 380-410 °С [6]

Потери массы в интервале температур 380-410 °С (Рисунок 2) связаны с разложением гидроксогруппы в составе гидратгидрокарбонатов магния. В воздушных условиях потери массы при разложении гидроксогруппы не изменяются в течение 3-28 суток твердения. Это показывает то, что образование  $Mg(OH)_2$  в воздушных условиях ограничено и практически прекращается при расходовании затворителя. В водных условиях твердения образование продуктов гидратации магнезиального гидрокарбонатного цемента идет интенсивнее из-за постоянного присутствия и участия водной среды в реакциях.

При взаимодействии гидроксида магния и бикарбоната магния по реакциям 11-14 возможно выделение  $CO_2$  [6], который способствует образованию вторичного бикарбоната магния:



Вторичный бикарбонат магния вновь взаимодействует с гидроксидом магния с образованием новых порций продуктов гидратации магнезиального цемента.

## 1.5 Фазообразование и изменение фаз в системе MgO-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O

При затворении магниального вяжущего раствором бикарбоната магния идет образование продуктов гидратации, гидроксида магния Mg(OH)<sub>2</sub>, гидрокарбонатов и гидратгидроксикарбонатов магния, а также фазовые переходы самих продуктов гидратации. В твердеющей цементной системе непрерывно протекают процессы перекристаллизации и перестройки структуры.

Фазовая диаграмма системы MgO-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O представлена на рисунке 3.

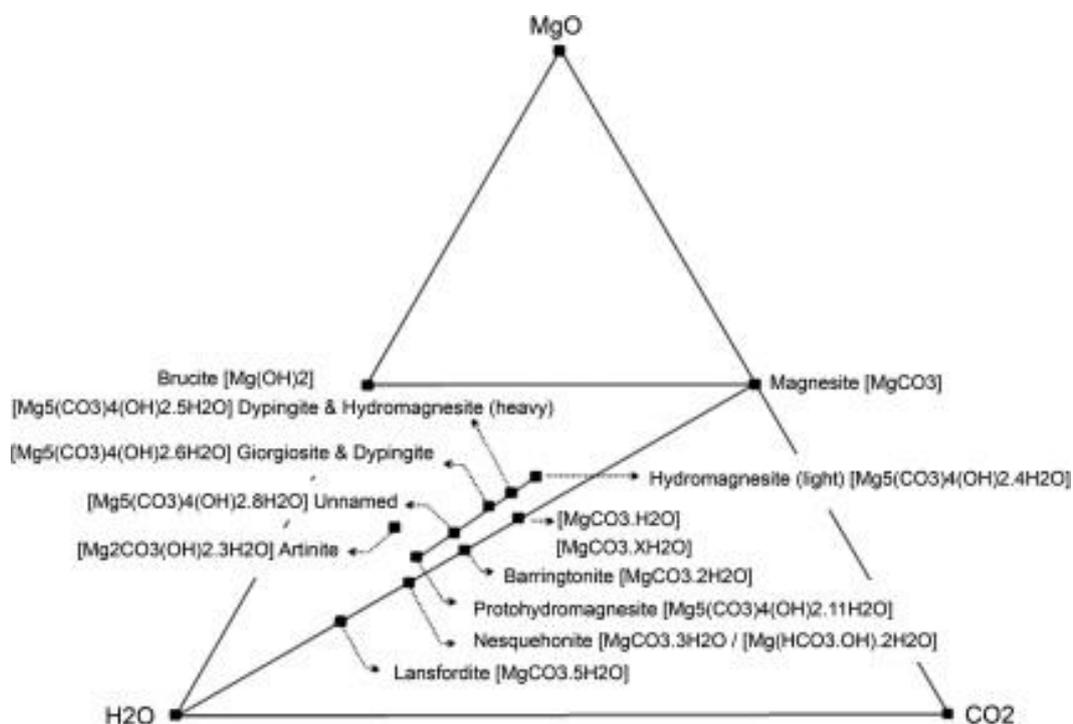


Рисунок 3 – Диаграмма состояния системы MgO-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O [39]

В системе MgO-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O возможно образование следующих соединений:

- брусит Mg(OH)<sub>2</sub>;
- магнезит MgCO<sub>3</sub>;
- гидрокарбонаты магния: баррингтонит MgCO<sub>3</sub>·2H<sub>2</sub>O, несквегонит MgCO<sub>3</sub>·3H<sub>2</sub>O, лансфордит MgCO<sub>3</sub>·5H<sub>2</sub>O;
- гидратгидроксикарбонаты магния: гидромагнезит 4Mg(OH)<sub>2</sub>·MgCO<sub>3</sub>·4H<sub>2</sub>O, дипингит 4Mg(OH)<sub>2</sub>·MgCO<sub>3</sub>·5H<sub>2</sub>O, жиоржиозит 4Mg(OH)<sub>2</sub>·MgCO<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O, артинит Mg(OH)<sub>2</sub>·MgCO<sub>3</sub>·3H<sub>2</sub>O.

Фазовые равновесия, стабильности и условия образования большинства фаз системы MgO-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O все еще обсуждаются. Однако исследования [6, 34-39] показывают, что в составе продуктов гидратации и твердения цементной системы MgO-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O при нормальных условиях часто наблюдаются несквегонит MgCO<sub>3</sub>·3H<sub>2</sub>O, гидромагнезит 4Mg(OH)<sub>2</sub>·MgCO<sub>3</sub>·4H<sub>2</sub>O и дипингит 4Mg(OH)<sub>2</sub>·MgCO<sub>3</sub>·5H<sub>2</sub>O, реже артинит Mg(OH)<sub>2</sub>·MgCO<sub>3</sub>·3H<sub>2</sub>O. Было выявлено [34], что гидромагнезит 4MgCO<sub>3</sub>·Mg(OH)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O и несквегонит MgCO<sub>3</sub>·3H<sub>2</sub>O стабильны при низких температурах, при этом стабильность гидромагнезита выше. При перекристаллизации и перестройке структур возможен фазовый переход несквегонита в более стабильный гидромагнезит, через образование дипингита по схеме [39]:



Реакции последовательного образования дипингита и гидромагнезита из несквегонита:



На рисунке 4 показана стабильность некоторых фаз (брусит Mg(OH)<sub>2</sub>, магнезит MgCO<sub>3</sub>, несквегонит MgCO<sub>3</sub>·3H<sub>2</sub>O и гидромагнезит 4MgCO<sub>3</sub>·Mg(OH)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O) относительно оксида магния MgO в виде химических потенциалов или энергий образования из MgO, H<sub>2</sub>O и CO<sub>2</sub> при температурах 275-375 К и атмосферном давлении [34]. Чем ниже химический потенциал, тем устойчивее фаза.

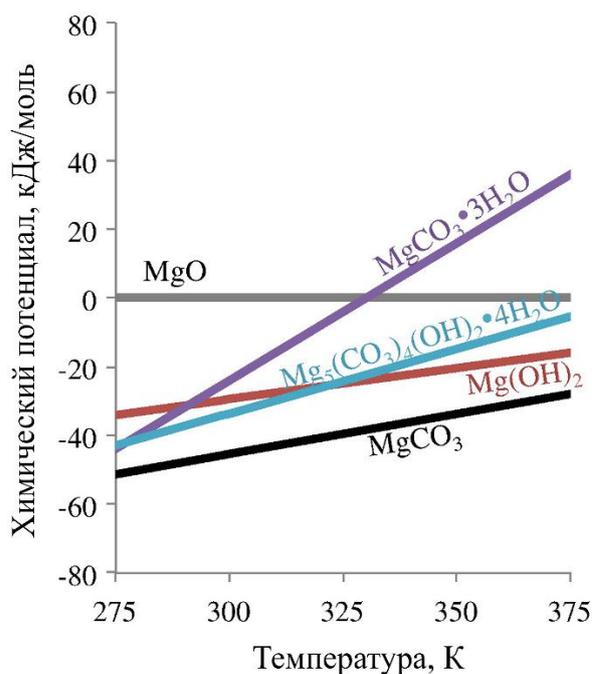
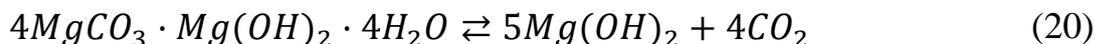


Рисунок 4 – Стабильность фаз системы MgO-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O [34]

Из рисунка 4 следует, что при низких температурах несквегонит и гидромагнезит стабильнее брусита. Гидромагнезит стабильнее несквегонита на всем интервале температур 275-375 К. При температуре 291 К наблюдается фазовое равновесие несквегонита и брусита:



Аналогично для гидромагнезита и брусита фазовое равновесие при температуре 321 К:



В таблице 3 приведено описание кристаллических строений фаз магниального гидрокарбонатного цемента.

Таблица 3 – Строение кристаллов фаз магниального гидрокарбонатного цемента

Фаза	Строение
Брусит $Mg(OH)_2$	Таблитчатые кристаллы в пластинчатых или листоватых массах и розетках
Несквегонит $MgCO_3 \cdot 3H_2O$	Игольчатые кристаллы, сферолиты
Гидромагнезит $4MgCO_3 \cdot Mg(OH)_2 \cdot 4H_2O$	Агрегаты в виде розеток из игольчатых или листоватых кристаллов
Дипингит $4MgCO_3 \cdot Mg(OH)_2 \cdot 5H_2O$	Удлиненные столбчатые кристаллы, шарообразные агрегаты
Артинит $MgCO_3 \cdot Mg(OH)_2 \cdot 3H_2O$	Игольчатые кристаллы, радиально-лучистые агрегаты

### 1.6 Предпосылки исследований

Магниальные цементы являются перспективной ресурсо- и энергоэффективной альтернативой портландцемента, но их применение на данный момент ограничено вследствие низкой водостойкости. Предложенные в научных статьях способы повышения водостойкости неорганическими, органическими и минеральными добавками защищают от воздействия воды лишь часть растворимых фаз и снижают прочность цемента. Совмещение методов карбонизации и применения минеральных добавок повышает водостойкость магниальных цементов без потери прочности, но усложняет технологию получения изделий из магниального вяжущего и повышает их стоимость.

Замена традиционных жидкостей затворения, растворов хлорида магния  $MgCl_2$  и сульфата магния  $MgSO_4$ , на водный раствор бикарбоната магния  $Mg(HCO_3)_2$  позволяет исключить образование растворимых фаз и получить гидравлический магниальный гидрокарбонатный цемент, способный твердеть как на воздухе, так и в воде.

Предыдущие исследования [38] показали, что прочность твердевших в воде образцов магниезального гидрокарбонатного цемента выше прочности образцов, твердевших на воздухе. Однако, сам процесс твердения магниезального гидрокарбонатного цемента в воде остается неизученным.

Система  $MgO-CO_2-H_2O$  ранее исследовалась в целях синтеза отдельных фаз гидратов и гидратированных карбонатов магния, и применение в цементном камне мало изучено.

Твердение и набор прочности в воде магниезального гидрокарбонатного цемента может быть объяснено протеканием непрерывных процессов гидратации, вследствие участия водной среды в синтезе фаз цемента.

Предполагается, что при твердении магниезального гидрокарбонатного цемента в воде в открытой системе образование продуктов гидратации идет интенсивнее из-за растворения  $CO_2$  из атмосферы в воде и его поглощения твердеющей системой.

Целью данной работы является исследование процесса синтеза гидрокарбонатных магниезальных структур при твердении гидравлического магниезального вяжущего в водных условиях.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Получение образцов гидравлического магниезального вяжущего на основе порошка каустического магнезита и водного раствора бикарбоната магния в качестве затворителя;
2. Осуществление твердения образцов в водных условиях в закрытой и открытой системах;
3. Определение характеристик среды твердения;
4. Определение прочностных свойств образцов;
5. Установление закономерности изменения структуры при твердении в воде в закрытой и открытой системах.

## 2 ХАРАКТЕРИСТИКА ИСХОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДОВ

### 2.1 Характеристика исходных материалов

Для получения гидравлического магнезиального гидрокарбонатного цемента были использованы каустический магнезиальный порошок и водный раствор бикарбоната магния  $Mg(HCO_3)_2$  в качестве затворителя.

#### 2.1.1 Каустический магнезит

Каустический магнезиальный порошок, полученный обжигом магнезитовой породы Савинского месторождения Иркутской области при  $800\text{ }^\circ\text{C}$  на предприятии ООО «Сибирские порошки» (г. Иркутск), был использован в качестве магнезиального вяжущего. Химический состав применяемого каустического магнезиального порошка представлен в таблице 4.

Таблица 4 – Химический состав каустического магнезита

Содержание оксидов, мас. %						
MgO	CaO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Δm <sub>пр</sub>	Сумма
78,6	4,5	2,5	2,8	0,35	16,5	105,25

По химическому составу магнезиальное вяжущее соответствует магнезиальному каустическому порошку марки ПМК-75 ГОСТ 1216-87 [40].

Требования по составу ПМК-75 в массовых долях [40]:

- MgO – не менее 75 %;
- CaO – не более 4,5 %;
- SiO<sub>2</sub> – не более 3,5 %;
- изменение массы при прокаливании – не более 18 %.

Потери массы при прокаливании в каустическом магнезиальном порошке связаны с декарбонизацией остаточного магнезита  $MgCO_3$ . Его наличие в составе магнезиального вяжущего в виде полумагнезитовых высокодефектных частиц желательно, так как было установлено [41], что при содержании магнезита в каустическом магнезиальном порошке до 18 % образуется прочный бездефектный магнезиальный цементный камень. При составе магнезиального вяжущего полностью из активного  $MgO$  возможно образование трещин при твердении цемента из-за большого количества образующегося  $Mg(OH)_2$  с увеличением объема. Для получения качественного магнезиального вяжущего рекомендуется [41] обжиг магнезита при низких температурах обжига 660-800 °С до степени декарбонизации 92-95%.

Рентгенограмма и термограмма используемого каустического магнезита приведены на рисунках 5 и 6.

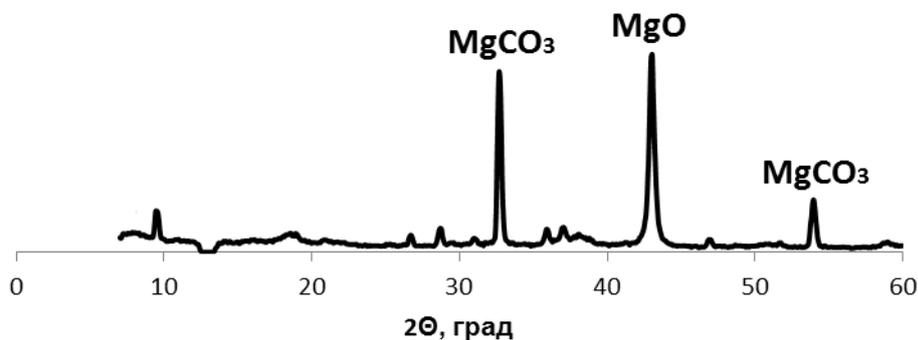


Рисунок 5 – Рентгенограмма каустического магнезиального порошка

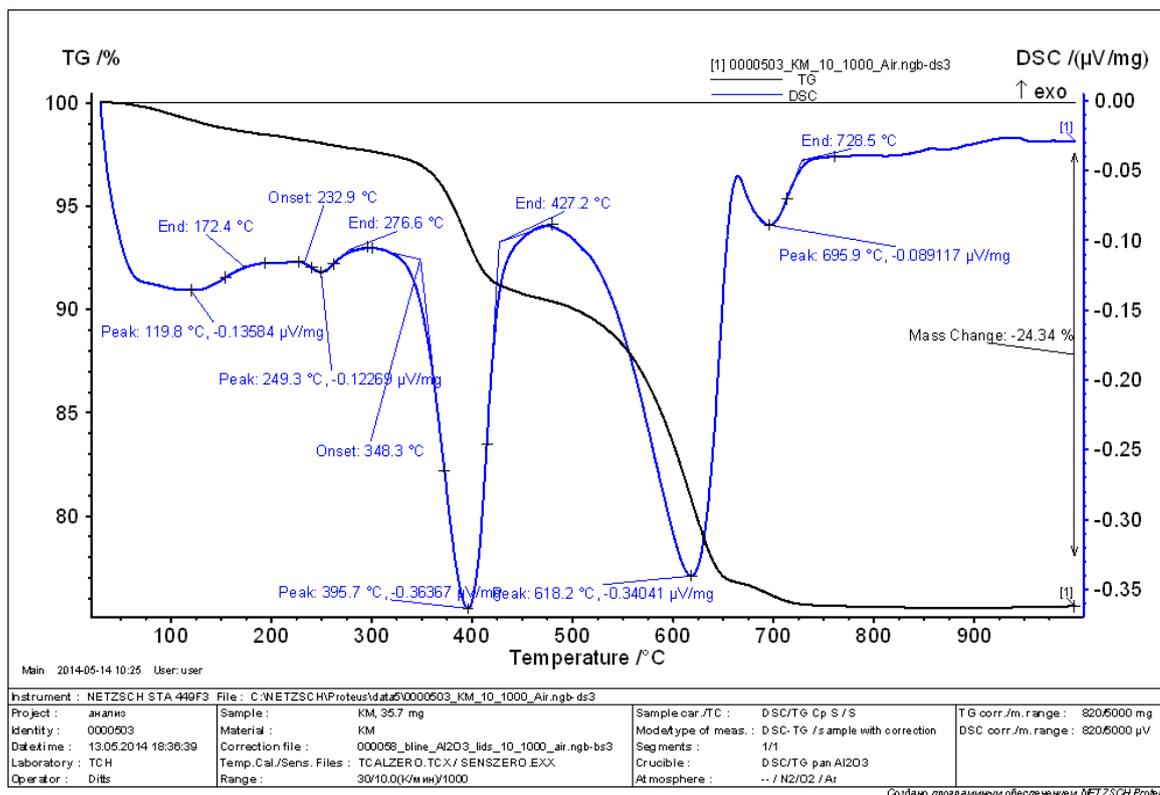


Рисунок 6 – Термограмма каустического магниального порошка

Основными кристаллическими фазами каустического магнезита (Рисунки 5, 6) являются оксид магния  $MgO$ , брусит  $Mg(OH)_2$  и магнезит  $MgCO_3$ . Наличие небольшого количества аморфного  $Mg(OH)_2$  в составе каустического магниального порошка объясняется способностью магниального вяжущего поглощать влагу из воздуха с образованием брусита  $Mg(OH)_2$ .

### 2.1.2 Раствор бикарбоната магния

Водный раствор бикарбоната магния  $Mg(HCO_3)_2$  (БКМ) был приготовлен искусственной карбонизацией суспензии каустического брусита при давлении углекислого газа 5-7 МПа. Процесс карбонизации проводился в течение 30 минут.

Получение бикарбоната магния основано на следующей реакции:



Концентрация водного раствора бикарбоната магния по гидрокарбонат-иону составляет 11-13 г/л.

## 2.2 Методы исследований

### 2.2.1 Постановка эксперимента

Магнезиальный гидрокарбонатный цемент был получен смешиванием каустического магнезиального порошка с водным раствором бикарбоната магния при водотвердом отношении В/Т равным 0,42. Образцы из магнезиального цемента размерами 3×3×3 см предварительно схватывались и твердели в формах в течение 24 часов в воздушно-сухой среде без доступа окружающего воздуха. Далее образцы извлекались из форм и были погружены в ёмкости с дистиллированной водой объемом 200 мл и твердели в водной среде в течение разного времени:

- I этап - 15 мин, 1 ч, 3 ч, 6 ч, 24 ч и 72 ч;
- II этап – 3, 7, 14, 28 суток.

Типы систем твердения: открытая и закрытая. В открытой системе уровень воды в ёмкостях поддерживался постоянным во избежание изменения объема и концентрации растворенных ионов из-за испарения воды. Для создания закрытой системы и предотвращения проникновения окружающего воздуха ёмкости с водой герметично закрывались.

По достижении контрольных сроков твердения образцы извлекались из емкостей, отбиралась проба среды твердения для определения концентраций карбонат- и гидрокарбонат-ионов и рН. Затем проводились опыты на определения средней прочности на сжатие и объемного фазового состава извлеченных из воды образцов, твердевших до 28 суток (II этап). Определение

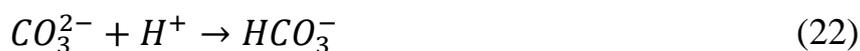
истинной плотности порошков магнезиального цемента применялось в работе для расчета объемного фазового состава.

С целью установления изменения структуры и фазового состава образцов во время твердения провели рентгенофазовый анализ, термический анализ, масс-спектроскопию и электронную микроскопию. Для этого предварительно была проведена подготовка проб для исследования:

- измельчение в ступке образцов после измерения прочности на сжатие до размеров около 3-5 мм;
- сушка в ацетоне в течение 7 дней для предотвращения процессов гидратации в закрытых бюксах;
- пропускание через фильтр «красная лента» образцов с ацетоном;
- окончательная сушка образцов в сушильном шкафу;
- отправление пробы на электронную микроскопию;
- измельчение пробы в ступке до состояния пудры для рентгенофазового и термического анализов и масс-спектрометрии.

### 2.2.2 Определение концентрации ионов $\text{CO}_3^{2-}$ и $\text{HCO}_3^-$

Определение концентрации карбонат-ионов  $\text{CO}_3^{2-}$  и гидрокарбонат-ионов  $\text{HCO}_3^-$  титриметрическим способом основано на следующих реакциях:



В качестве титранта используется раствор соляной кислоты  $\text{HCl}$  известной концентрации, индикаторы – фенолфталеин для определения карбонат-ионов и метиловый оранжевый для определения гидрокарбонат-ионов.

Отобранная пипеткой аликвота исследуемого раствора объемом 25 мл переносится в коническую колбу и титруется рабочим раствором  $\text{HCl}$  в среде фенолфталеина (2-3 капли) до изменения окраски с фиолетовой до слабо-розовой. Для определения гидрокарбонат-иона в раствор, оставшийся после

титрования, вносят 1-2 капли метилового оранжевого и титруют раствором HCl до изменения окраски раствора с желтой до розовой. Титрование повторяют до 3-х воспроизводимых результатов.

Определяют средние объемы титранта  $V_k$  и  $V_{гк}$ , израсходованных на титрование карбонат- и гидрокарбонат-ионов соответственно.

Концентрации ионов (моль/л) рассчитываются по уравнениям:

$$C(CO_3^{2-}) = \frac{V_k \cdot C_H(HCl)}{V_a}, \quad (24)$$

$$C(HCO_3^-) = \frac{V_{гк} \cdot C_H(HCl)}{V_a}, \quad (25)$$

где  $C_H(HCl)$  – концентрация соляной кислоты, моль/л;  $V_a$  – объем отобранной аликвоты или пробы раствора, мл.

### 2.2.3 Измерение pH среды

Для определения pH среды твердения использовали pH-метр S80 SevenMulti фирмы Mettler Toledo с комплексным электродом. Перед серией исследований pH-метр откалибровывают с помощью стандарт-титров разных pH. Мембрана электрода до и после исследований обильно промывается дистиллированной водой и хранится в растворе KCl с концентрацией 3 моль/л.

Последовательность работы с pH-метром:

- включить pH-модуль,
- погрузить электрод в отобранный образец среды твердения,
- нажать клавишу «Read» для начала измерения,
- фиксация результата измерения.

## 2.2.4 Определение предела прочности на сжатие

Для определения предела прочности при сжатии готовят магниальное тесто заданного состава и формируют образцы.

Образцы твердеют в течение 24 часов в воздушно-сухих условиях без доступа окружающего воздуха, после чего помещаются в среду твердения.

По истечении контрольного срока в среде твердения измеряют линейные размеры образцов и испытывают на прессе для определения прочности.

Предел прочности на сжатие рассчитывается по формуле:

$$R_{сж} = \frac{P_{ман} \cdot K \cdot 9,807}{S \cdot 100}, \quad (26)$$

где  $R_{сж}$  – предел прочности на сжатие, МПа;  $P_{ман}$  – показатель манометра, мВ;  $K = 38,2$  кгс/мВ – коэффициент манометра;  $S$  – площадь образца, см<sup>2</sup>;  $9,807/100$  – коэффициенты для пересчета предела прочности из кгс/см<sup>2</sup> в МПа.

## 2.2.5 Определение объемного фазового состава

Определение объемных концентраций твердой  $K_T$ , жидкой  $K_J$  и газовой  $K_G$  фаз направлено на исследование и анализ процессов гидратации и твердения в цементном камне [40]. Метод основан на законе постоянства объемного фазового состава дисперсных систем:

$$K_{T1} + K_{J1} + K_{G1} = K_{T2} + K_{J2} + K_{G2} = 1, \quad (27)$$

где  $K_{T1}$ ,  $K_{J1}$ ,  $K_{G1}$  – объемные доли фаз системы в исходном состоянии;  $K_{T2}$ ,  $K_{J2}$ ,  $K_{G2}$  – объемные доли фаз системы в промежуточном или конечном состоянии системы.

Для определения начальных значений объемных долей фаз готовят цементное тесто заданного состава и вычисляют начальную кажущуюся плотность во влажном состоянии при известном объеме:

$$\rho_{вл} = \frac{m_{вл}}{V_{вл}}, \text{ г/см}^3, \quad (28)$$

где  $m_{\text{вл}}$  – масса влажного образца, г;  $V_{\text{вл}}$  – объем влажного образца,  $\text{см}^3$ .

Далее рассчитывается плотность материала в сухом состоянии и исходные значения концентраций фаз:

$$\rho_{\text{сух}} = \frac{\rho_{\text{вл}}}{1 + W_A}, \text{ г/см}^3; \quad (29)$$

$$K_{\text{T}1} = \frac{\rho_{\text{сух}}}{\rho_{\text{ист}}}; \quad (30)$$

$$K_{\text{Ж}1} = W_A \cdot \rho_{\text{сух}}; \quad (31)$$

$$K_{\text{Г}1} = 1 - K_{\text{T}1} - K_{\text{Ж}1}; \quad (32)$$

где  $W_A$  – абсолютная влажность образца;  $\rho_{\text{ист}}$  – истинная плотность цемента,  $\text{г/см}^3$ .

Для расчета объемных концентраций фаз при определенных сроках твердения определяют массу, объем и плотность влажных образцов и высушивают при температуре  $60^\circ\text{C}$  до постоянной массы. Рассчитывают влажность образцов после твердения по формуле:

$$W_c = \frac{\Delta m_1}{m_{\text{сух}}} \quad (33)$$

Определяют плотность сухого гидратированного образца и объемную концентрацию жидкой фазы:

$$\rho_{\text{сух}}^{\text{Г}} = \frac{\rho_{\text{вл}}}{1 + W_c}, \text{ г/см}^3; \quad (34)$$

$$K_{\text{Ж}2} = W_c \cdot \rho_{\text{сух}}^{\text{Г}}. \quad (35)$$

После определения истинной плотности сухого гидратированного цемента пикнометрическим методом рассчитывается объемное содержание твердой фазы  $K_{\text{T}2}$  и газообразной фазы  $K_{\text{Г}2}$ :

$$K_{\text{T}2} = \frac{\rho_{\text{сух}}^{\text{Г}}}{\rho_{\text{ист}}^{\text{Г}}}; \quad (36)$$

$$K_{\text{Г}2} = 1 - K_{\text{T}2} - K_{\text{Ж}2}. \quad (37)$$

Также рассчитываются основные параметры гидратации и твердения цемента (степень гидратации  $\alpha_{\text{г}}$ , объемная концентрация новообразований  $N$ , структурно-энергетический параметр  $n$ , и степень перестройки структур  $\alpha_{\text{п}}$ ):

$$\alpha_{\Gamma} = \frac{K_{ж1} - K_{ж2}}{K_{ж1}}; \quad (38)$$

$$N = \frac{K_{Т2} - K_{Т1}}{1 - K_{Т1}}; \quad (39)$$

$$n = \frac{K_{Т2}}{1 - K_{Т2}} / \frac{K_{Т1}}{1 - K_{Т1}}; \quad (40)$$

$$\alpha_{\Pi} = \frac{n_i - 1}{n_i};$$

где  $n_i$  – текущее значение параметра  $n$  в различные сроки твердения.

По результатам определения фазовых характеристик цементного теста в начальном состоянии и цементных образцов в течении всего срока твердения строится тройная фазовая диаграмма  $K_{Т}$ - $K_{ж}$ - $K_{Г}$ . Пример построения фазовой диаграммы показан на рисунке 7 [40].

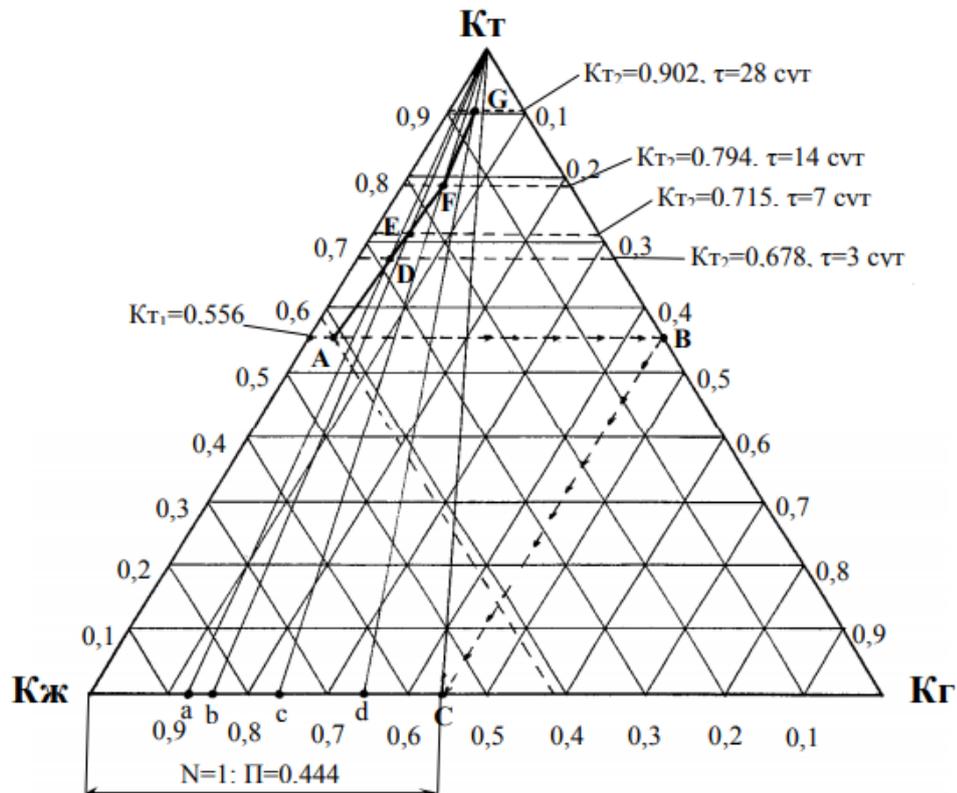


Рисунок 7 – Пример построения фазовой диаграммы процессов гидратации и твердения цемента [40]

## 2.2.6 Определение истинной плотности

Определение истинной плотности порошкообразных материалов проводили с помощью пикнометрического метода. Суть метода заключается в определении плотности материала по объему вытесненной жидкости в пикнометре.

Навеску (3-5 г) измельченного в порошок материала вносят в предварительно взвешенный на аналитических весах пикнометр ( $m$ ) известного объема и определяют массу пикнометра вместе с материалом ( $m_1$ ). В пикнометр наливают керосин с известной плотностью ( $\rho_{ж}$ ) на 1/3 его объема и вакуумируют в вакуум-эксикаторе для удаления воздуха из материала в течение 20-30 минут. После вакуумирования доводят уровень жидкости в пикнометре до метки и определяют массу пикнометра с жидкостью и с материалом ( $m_2$ ). Промытый и высушенный пикнометр после определения  $m_2$  наполняют до метки керосином и взвешивают ( $m_3$ ).

Истинная плотность материала определяется как среднее значение из трех по формуле:

$$\rho_{ист} = \frac{(m_1 - m) \cdot \rho_{ж}}{m_3 + (m_1 - m) - m_2}, \text{ г/см}^3 \quad (41)$$

## 2.2.7 Рентгенофазовый анализ

Рентгенофазовый анализ (РФА) является методом определения фазового состава кристаллических тел.

В основе рентгенофазового анализа лежит явление дифракции рентгеновских лучей на кристаллической решетке.

Необходимое условие дифракции рентгеновских лучей – выполнение уравнения Вульфа-Бреггов:

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin\theta, \quad (42)$$

где  $n$  – порядок отражения (1, 2, 3);  $\lambda$  – длина волны рентгеновского луча, нм;  $d$  – межплоскостной интервал, нм;  $\theta$  – угол падения рентгеновского луча, град.

В данной исследовательской работе рентгенофазовый анализ исследуемых материалов проводили на приборе ДРОН – 3М, где применяется рентгеновская трубка БСВ-29 с  $\text{Cu}_{K\alpha}$  - излучением и следующими характеристиками:

- точность съемки – 1000, 2000;
- напряжение анод-катод – 35 кВ;
- анодный ток – 25 мА;
- скорость вращения гониометра – 4 град/мин.

Расшифровку рентгенограмм проводили с помощью программы Crystallographic Search – Match.

#### 2.2.8 Термический анализ

Термический анализ подразделяется на следующие методы:

- дифференциально-сканирующая калориметрия (ДСК);
- дифференциально-термический анализ (ДТА);
- термогравиметрия (ТГ).

Дифференциально-термический анализ основан на сопоставлении термических свойств исследуемого вещества и термически инертного вещества, которое принимается в качестве эталонного.

Дифференциально-сканирующая калориметрия позволяет фиксировать тепловой поток, отражающий происходящие в веществе физико-химические процессы при нагревании.

При исследовании образцов ДСК и ДТА получают характерные эндотермические эффекты, которые возникают в результате дегидратации и

разрушения кристаллической структуры, и экзотермические эффекты, обусловленные образованием новых фаз.

Термогравиметрия – метод термического анализа, основанный на регистрации изменения массы образца при нагревании, вследствие выделения газообразных веществ или в результате различных химических, физических и физико-химических процессов.

Для проведения термического анализа в работе использовался дифференциально-термический анализатор STA 449 F3 Jupiter фирмы «NETZSCH», представляющий собой сопряженный ДСК-ТГ прибор. Термоанализ проводили до 1000 °С.

#### 2.2.9 Масс-спектрометрия

Масс-спектрометрия – это метод исследования и анализа веществ, который основан на ионизации молекул, разделении в электромагнитном поле образующихся ионов и их регистрации по отношению массы к заряду.

Масс-спектрометрия проводится совместно с термическим анализом. Регистрируется изменение ионного тока по выбранным молекулярным массам в заданном температурном интервале. Анализ выделяющихся газообразных веществ при нагревании до 1000 °С проводился на квадрупольном масс-спектрометре QMS-403D, производства фирмы «NETZSCH».

#### 2.2.10 Электронная микроскопия

Принцип работы электронного микроскопа заключается в испускании пучка электронов и получении изображения, при отражении их от поверхности исследуемого материала.

Анализ структуры исследуемых объектов проводился с помощью настольного растрового электронного микроскопа JCM-6000.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ  
И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

<b>Группа</b>		<b>ФИО</b>	
4ГМ93		Охлопкова Анна Владимировна	
<b>Школа</b>	<b>ИШНПТ</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<b>НОЦ Н.М. Кижнера</b>
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление/специальность</b>	18.04.01 «Химическая технология»

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Томска. Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>Норма амортизационных отчислений на специальное оборудование</i>
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Отчисления во внебюджетные фонды 30 %</i>

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. <i>Анализ конкурентных технических решений (НИ)</i>	<i>Расчет конкурентоспособности SWOT-анализ</i>
2. <i>Формирование плана и графика разработки и внедрения (НИ)</i>	<i>Структура работ. Определение трудоемкости. Разработка графика проведения исследования</i>
3. <i>Составление бюджета инженерного проекта (НИ)</i>	<i>Расчет бюджетной стоимости НИ</i>
4. <i>Оценка ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности (НИ)</i>	<i>Интегральный финансовый показатель. Интегральный показатель ресурсоэффективности. Интегральный показатель эффективности.</i>

**Перечень графического материала**

1. Оценка конкурентоспособности ИП
2. Матрица SWOT
3. Диаграмма Ганта
4. Бюджет НИ
5. Основные показатели эффективности НИ

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	01.02.2021
---	------------

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент ОСГН ШБИП	Кашук Ирина Вадимовна	к.т.н доцент		08.02.21

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
4ГМ93	Охлопкова Анна Владимировна		08.02.21

#### 4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Рациональное природопользование является одним из приоритетных направлений развития науки, технологий и техники. В отличие от широко используемого портландцемента производство магнезиальных вяжущих менее энергозатратно. Для обжига клинкера в производстве портландцемента требуется температура в печи до 1450 °С. Обжиг магнезита, сырья для производства магнезиальных вяжущих, протекает при температуре до 850 °С, и сопровождается меньшим расходом топлива и электроэнергии [5].

Магнезиальные вяжущие обладают повышенной механической прочностью, износостойкостью и термостойкостью, быстро схватываются и обладают высокой адгезией к широкому ряду наполнителей. Сдерживающим фактором применения магнезиальных цементов в строительстве является их низкая водостойкость. На решение этой проблемы нацелено настоящее исследование, результаты которого могут помочь найти более экономичный и экологичный аналог портландцемента.

Целью данного раздела является оценка перспективности развития и планирование коммерческой ценности конечного продукта, представленного в рамках исследовательской работы.

Данный раздел, предусматривает рассмотрение следующих задач:

- оценка коммерческого потенциала разработки;
- планирование научно-исследовательской работы;
- расчет бюджета научно-исследовательской работы;
- определение ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности исследования.

#### 4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

##### 4.1.1 Анализ конкурентных технических решений

Повышение водостойкости магнезиального вяжущего в данном исследовании достигнуто, благодаря замене традиционной жидкости затворения, водного раствора хлорида магния  $MgCl_2$ , на водный раствор гидрокарбоната магния  $Mg(HCO_3)_2$  (индекс «ф»), что позволяет исключить возможность образования в цементе растворимых фаз. Конкурентные технические решения в этом плане – замена жидкости затворения на раствор сульфата магния  $MgSO_4$  (индекс «к1») или раствор дигидроортофосфата аммония  $(NH_4)H_2PO_4$  (индекс «к2»). В таблице 12 представлено сравнение конкурентных разработок и разработки данного НИ.

Таблица 12 – Сравнение конкурентных технических разработок

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к1</sub>	К <sub>к2</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>							
1. Актуальность исследования	0,12	5	5	5	0,6	0,6	0,6
2. Прочность изделия	0,16	4	5	4	0,64	0,8	0,64
3. Водостойкость изделия	0,16	5	4	3	0,8	0,64	0,48
4. Простота изготовления	0,12	4	3	2	0,48	0,36	0,24
5. Безопасность	0,12	4	4	3	0,48	0,48	0,36
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>							
1. Цена сырья	0,12	5	3	3	0,6	0,36	0,36
2. Предполагаемый срок эксплуатации	0,12	4	4	3	0,48	0,48	0,36
3. Финансирование научной разработки	0,08	4	4	5	0,32	0,32	0,4
<b>Итого</b>	<b>1</b>	<b>35</b>	<b>32</b>	<b>28</b>	<b>4,4</b>	<b>4,04</b>	<b>3,44</b>

Конкурентноспособность научной разработки определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot Б_i = (0,12 \cdot 5) + (0,16 \cdot 4) + (0,16 \cdot 5) + (0,12 \cdot 4) + \\ + (0,12 \cdot 4) + (0,12 \cdot 5) + (0,12 \cdot 4) + (0,08 \cdot 4) = 4,4, \quad (51)$$

где  $K$  – конкурентноспособность научной разработки;  $B_i$  – вес  $i$ -го показателя;  $Б_i$  – балл  $i$ -го показателя.

Проведенный анализ конкурентных технических решений показал, что исследование является наиболее актуальным и перспективным, имеет конкурентоспособность.

#### 4.1.2 SWOT-анализ

SWOT-анализ – это комплексный анализ научного исследования, позволяющий выделить сильные и слабые стороны проекта, а также определить возможности и угрозы реализации.

Первый этап, составляется матрица SWOT, в которую описаны слабые и сильные стороны проекта и выявленные возможности и угрозы для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде, приведены в таблице 13.

Таблица 13 – Матрица SWOT-анализа

<b>Сильные стороны</b>	<b>Слабые стороны</b>
С1. Экономичность и энергоэффективность технологии.	Сл1. Отсутствие ссылок и материалов для соответствующих научных исследований.
С2. Высокая водостойкость и повышенная прочность продукции.	Сл2. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой.
С3. Простота изготовления.	Сл3. Отсутствие инжиниринговой компании, способной построить производство под ключ.
С4. Экологичность технологии.	Сл4. Эксперименты имеют большие погрешности и неопределенности.
С5. Квалифицированный персонал.	
<b>Возможности</b>	<b>Угрозы</b>
В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ.	У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства.
В2. Появление потенциального спроса на новые разработки.	У2. Появление зарубежных аналогов и более ранний их выход на рынок.
В3. Внедрение технологии в область строительства.	
В4. Внедрение на мировой рынок, экспорт за рубеж.	

На втором этапе на основании матрицы SWOT строятся интерактивные матрицы возможностей и угроз, позволяющие оценить эффективность проекта, а также надежность его реализации. Соотношения параметров представлены в таблицах 14-17.

Таблица 14 – Интерактивная матрица проекта «Возможности проекта и сильные стороны»

<b>Сильные стороны проекта</b>						
<b>Возможности проекта</b>		C1	C2	C3	C4	C5
	B1	-	-	-	-	-
	B2	-	+	+	-	-
	B3	+	+	+	-	-
	B4	+	+	-	+	-

Таблица 15 – Интерактивная матрица проекта «Возможности проекта и слабые стороны»

<b>Слабые стороны проекта</b>					
<b>Возможности проекта</b>		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
	B1	+	-	-	+
	B2	-	-	-	-
	B3	-	-	-	-
	B4	-	-	-	-

Таблица 16 – Интерактивная матрица проекта «Угрозы проекта и сильные стороны»

<b>Сильные стороны проекта</b>						
<b>Угрозы проекта</b>		C1	C2	C3	C4	C5
	У1	+	-	-	+	-
	У2	-	+	+	-	-

Таблица 17 – Интерактивная матрица проекта «Угрозы проекта и слабые стороны»

<b>Слабые стороны проекта</b>					
<b>Угрозы проекта</b>		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
	У1	+	-	-	+
	У2	-	-	-	-

Результаты анализа представлены в итоговой таблице 18.

Таблица 18 – Итоговая таблица SWOT-анализа

	<p><b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта</b></p> <p>C1. Экономичность и энергоэффективность технологии.</p> <p>C2. Высокая водостойкость и повышенная прочность продукции.</p> <p>C3. Простота изготовления.</p> <p>C4. Экологичность технологии</p>	<p><b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта</b></p> <p>Сл1. Отсутствие ссылок и материалов для соответствующих научных исследований.</p> <p>Сл2. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой.</p>
--	---	---

	С5. Квалифицированный персонал.	Сл3. Отсутствие инжиниринговой компании, способной построить производство под ключ. Сл4. Эксперименты имеют большие погрешности и неопределенности.
<p><b>Возможности</b></p> <p>В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ.</p> <p>В2. Появление потенциального спроса на новые разработки.</p> <p>В3. Внедрение технологии в область строительства.</p> <p>В4. Внедрение на мировой рынок, экспорт за рубеж.</p>	<p><b>Направления развития</b></p> <p>В2С2С3. Высокая водостойкость, повышенная прочность и простота изготовления продукции позволяет расширить спрос на новые разработки.</p> <p>В3С1С2С3. Высокая водостойкость и повышенная прочность продукции и экономичность технологии и простота изготовления материалов являются хорошим основанием для внедрения технологии в область строительства.</p> <p>В4С1С2С4. Экономичность и экологичность технологии и высокая водостойкость и повышенная прочность продукции являются основой для экспорта за рубеж и выхода на мировой рынок.</p>	<p><b>Сдерживающие факторы</b></p> <p>В1Сл1. Проведение необходимых экспериментов на оборудовании ТПУ позволит компенсировать отсутствие ссылок и материалов для соответствующих научных исследований.</p> <p>В1Сл4. Использование новейшего оборудования для удовлетворения требований исследований, также может уменьшить экспериментальную ошибку.</p>
<p><b>Угрозы</b></p> <p>У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства.</p> <p>У2. Появление зарубежных аналогов и более ранний их выход на рынок.</p>	<p><b>Угрозы развития</b></p> <p>У1С1С4. Несмотря на отсутствие спроса на новые технологии в области и широкое распространение портландцемента на рынке строительных материалов, современная тенденция к использованию более экологичных и экономичных технологий позволит развить и внедрить технологию гидравлических магнизиальных вяжущих.</p> <p>У2С2С3. Наши продукты обладают лучшими механическими свойствами, являются более привлекательными на мировом рынке.</p>	<p><b>Уязвимости:</b></p> <p>У1Сл1Сл4. Проведение дополнительных научных исследований и дальнейшее совершенствование технологии.</p>

В результате SWOT-анализа показано, что преимущества разрабатываемой технологии преобладают над ее недостатками. Данные недостатки, которые на данный момент на практике не устранены, но в теории уже есть возможности для их устранения. Основные направления повышения конкурентоспособности проекта: проведение дополнительных научных исследований, использование новейшего оборудования ТПУ и дальнейшее совершенствование технологии.

## 4.2 Планирование научно-исследовательских работ

### 4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса научно-исследовательских работ осуществляется в порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение количества исполнителей для каждой из работ;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Для оптимизации работ удобно использовать классический метод линейного планирования и управления.

Результатом такого планирования является составление линейного графика выполнения всех работ. Структура и содержание работ по этапам, а также определение исполнителей приведена в таблице 19.

Таблица 19 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания, утверждение плана-графика	Научный руководитель
	2	Календарное планирование выполнения НИР	Инженер, научный руководитель
Выбор способа решения поставленной задачи	3	Обзор научной литературы	Инженер
	4	Выбор методов исследования	Инженер, научный руководитель
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Планирование эксперимента	Инженер
	6	Подготовка материалов	Инженер
	7	Проведение эксперимента	Инженер
Обобщение и оценка результатов	8	Обработка полученных данных	Инженер, научный руководитель
	9	Оценка правильности полученных результатов	Инженер, научный руководитель
Оформление отчета по НИР	10	Составление пояснительной записки	Инженер

#### 4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения

Стоимость научного исследования в основном определяется трудовыми затратами каждого из участников.

Ожидаемое (среднее) значение трудоемкости рассчитывается с помощью формулы:

$$t_{ож_i} = \frac{3t_{min_i} + 2t_{max_i}}{5}, \quad (52)$$

где  $t_{ож_i}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения  $i$ -ой работы, чел.-дн.;  $t_{min_i}$  – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы, чел.-дн.;  $t_{max_i}$  – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы, чел.-дн.

Расчет продолжительности работ в рабочих днях производится по формуле:

$$T_{p_i} = \frac{t_{ож_i}}{Ч_i}, \quad (53)$$

где  $T_{p_i}$  – продолжительность одной работы, раб. дн.;  $t_{ож_i}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.;  $Ч_i$  – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

График проведения научного исследования составляется в виде диаграммы Ганта, который представляет собой горизонтальный ленточный график работ, описывающихся датами начала и конца их выполнения.

Для составления графика необходимо определить длительность работ в рабочих днях  $T_{p_i}$  и перевести полученные значения в календарные дни  $T_{к_i}$ :

$$T_{к_i} = T_{p_i} \cdot k_{кал}, \quad (54)$$

где  $k_{кал}$  – коэффициент календарности.

Расчет коэффициента календарности:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}} = \frac{365}{365 - 52 - 14} = 1,22, \quad (55)$$

где  $T_{кал}$ ,  $T_{вых}$ ,  $T_{пр}$  – количество календарных, выходных и праздничных дней в году соответственно.

Все полученные значения приведены в таблице 20.

Таблица 20 - Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях $T_{pi}$	Длительность работ в календарных днях $T_{ki}$
	$t_{min}$ , чел-дни		$t_{max}$ , чел-дни		$t_{ожид}$ , чел-дни			
	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1. Составление и утверждение технического задания, утверждение плана-графика	0,5	-	1,0	-	0,7	-	0,7	1
2. Календарное планирование выполнения НИР	0,5	0,5	1,0	1,0	0,7	0,7	0,7	1
3. Обзор научной литературы	-	7,0	-	14	-	9,8	9,8	12
4. Выбор методов исследования	0,5	0,5	1,0	1,0	0,7	0,7	0,7	1
5. Планирование эксперимента	-	0,5	-	1,0	-	0,7	0,7	1
6. Подготовка материалов	-	1,0	-	2,0	-	1,4	1,4	2
7. Проведение эксперимента	-	10,0	-	20,0	-	14,0	14,0	17
8. Обработка полученных данных	7,0	7,0	14,0	14,0	9,8	9,8	9,8	12
9. Оценка правильности полученных результатов	1,0	7,0	2,0	14,0	1,4	9,8	9,8	12
10. Составление пояснительной записки	-	30	-	50	-	38,0	38,0	46
<b>Итого:</b>	9,5	63,5	19	117	13,3	84,9	85,6	105

Примечание: Исп. 1 – научный руководитель, Исп. 2 – инженер.

На основе таблицы 20 построим календарный график-план (Таблица 21).

Таблица 21 – Календарный график-план проведения НИОКР

№	Вид работ	Исполнители	T <sub>кi</sub> , кал. дни	Продолжительность выполнения работ													
				Февраль			Март			Апрель			Май				
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3		
1	Составление и утверждение технического задания, утверждение плана-графика	Исп.1	1	■													
2	Календарное планирование выполнения НИР	Исп.1 Исп.2	1	■													
3	Обзор научной литературы	Исп.2	12	■	■												
4	Выбор методов исследования	Исп.1 Исп.2	1		■												
5	Планирование эксперимента	Исп.2	1		■												
6	Подготовка материалов	Исп.2	2		■												
7	Проведение эксперимента	Исп.2	17			■	■										
8	Обработка полученных данных	Исп.1 Исп.2	12					■	■								
9	Оценка правильности полученных результатов	Исп.1 Исп.2	12							■	■						
10	Составление пояснительной записки	Исп.2	46									■	■	■	■		

■ – Исп. 1 (научный руководитель), ■ – Исп. 2 (инженер).

### 4.3 Бюджет научно-технического исследования

При планировании бюджета научно-технического исследования учитывались все виды расходов, связанных с его выполнением. В этой работе использовать следующую группировку затрат по следующим статьям:

- материальные затраты научно-исследовательской работы (НИР);

- затраты на специальное оборудование для экспериментальных работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды;
- накладные расходы НИР.

#### 4.3.1 Расчет материальных затрат научно-технического исследования

Материальные затраты – это затраты организации на приобретение сырья и материалов для создания готовой продукции.

Данная часть включает затрат всех материалов, используемых при получении образцов магниального вяжущего, затворенных раствором бикарбоната магния, а также материалов, необходимых для подготовки образцов к анализам и их проведения. Расчет материальных затрат приведен в таблице 22.

Таблица 22 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, руб.
ПМК-75	кг	1,2	20	24
Раствор БКМ	м <sup>3</sup>	0,0005	50000	25
Раствор HCl	м <sup>3</sup>	0,001	20000	20
Фенолфталеин	кг	0,001	9200	9,20
Метилловый оранжевый	кг	0,001	11330	11,33
Ацетон	м <sup>3</sup>	0,0001	170400	17,04
Итого:				106,57

#### 4.3.2 Расчет амортизации специального оборудования

Затраты, связанные с приобретением специального оборудования, необходимого для проведения работ по теме, приведены в таблице 23.

Норма амортизации рассчитывается по формуле:

$$H_A = \frac{1}{n}, \quad (56)$$

где  $n$  – срок полезного использования в количестве лет.

Амортизация оборудования рассчитывается по формуле:

$$A = \frac{H_A \cdot I}{12} \cdot t, \quad (57)$$

где  $I$  – итоговая сумма, тыс. руб.;  $t$  – время использования, мес.

Таблица 23 – Расчет затрат на оборудование

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во ед.	Срок полезного использования, лет	Время использования, мес.	$H_A$ , %	Цена оборудования, руб.	Амортизация, руб.	
1	2	3	4	5	6	7	8	
1	ДСК-ТГ анализатор STA 449 F3 Jupiter	1	20	0,1	5	15000000	6250	
2	РФА-установка ДРОН-3М	1	20	0,1	5	18000000	7500	
3	Настольный растровый электронный микроскоп JCM-6000	1	20	0,03	5	18000000	2250	
Итого:								16000 руб.

### 4.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы

В данном разделе рассчитывается заработная плата инженера и руководителя, помимо этого необходимо рассчитать расходы по заработной плате, определяемые трудоемкостью проекта и действующей системой оклада.

Основная заработная плата находится по формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p, \quad (58)$$

где  $Z_{\text{дн}}$  – среднедневная заработная плата, руб;  $T_p$  – продолжительность работ, раб. дн.

Среднедневная заработная плата:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d}, \quad (59)$$

где  $Z_m$  – месячный должностной оклад, руб;  $M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года;  $F_d$  – действительный годовой фонд, раб. дн.

Месячный должностной оклад:

$$Z_m = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} \cdot k_d) \cdot k_p, \quad (60)$$

где  $Z_{\text{тс}}$  – заработная плата по тарифной ставке, руб.;  $k_{\text{пр}}$  – премиальный коэффициент;  $k_d$  – коэффициент доплат и надбавок;  $k_p$  – районный коэффициент.

Действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала определяется исходя из баланса рабочего времени (Таблица 24).

Таблица 24 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней:		
– выходные дни,	52	104
– праздничные дни.	14	14
Потери рабочего времени:		
– отпуск,	48	24
– невыходы по болезни.	5	10
Действительный годовой фонд рабочего времени	246	213

Расчет основной заработной платы приведен в таблице 25.

Заработная плата по тарифной ставке руководителя – 26300 руб./мес.,  
инженера – 17000 руб./мес.

Таблица 25 – Расчет основной заработной платы

Исполнители НИ	З <sub>тс</sub> , руб	$k_{пр}$	$k_d$	$k_p$	З <sub>м</sub> , руб	З <sub>дн</sub> , руб	Т <sub>р</sub> , раб. дн	З <sub>осн</sub> , руб
Руководитель	26300	0,3	0,2	1,3	51285	2147,3	13,3	28559,1
Инженер	17000				33150	1743,1	84,9	147989,2
Итого:								176548,3

#### 4.3.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций.

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} \quad (61)$$

где  $k_{доп}$  – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимаем равным 0,15).

Расчет дополнительной заработной платы:

$$Z_{доп.,рук.} = 0,15 \cdot 28559,1 = 4283,9 \text{ руб.}; \quad (62)$$

$$Z_{доп.,инж.} = 0,15 \cdot 147989,2 = 22198,4 \text{ руб.} \quad (63)$$

#### 4.3.5 Отчисление во внебюджетные фонды

Определяется по формуле:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}), \quad (64)$$

где  $k_{\text{внеб}}$  – коэффициент отчислений во внебюджетные фонды (общая ставка взносов составляет в 2021 году – 30%).

Расчет отчислений во внебюджетные фонды:

$$Z_{\text{внеб.,рук.}} = 0,3 \cdot (28559,1 + 4283,9) = 9852,9 \text{ руб.}; \quad (65)$$

$$Z_{\text{внеб.,инж.}} = 0,3 \cdot (147989,2 + 22198,4) = 51056,3 \text{ руб.} \quad (66)$$

#### 4.3.6 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов, и определяются по формуле:

$$Z_{\text{накл}} = k_{\text{нр}} \cdot \text{сумма статей}, \quad (67)$$

где  $k_{\text{нр}} = 0,16$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

#### 4.3.7 Бюджетная стоимость НИР

Затраты по статьям приведены в таблице 26.

Таблица 26 – Группировка затрат по статьям

Статьи							
1	2	3	4	5	6	7	8
Амортизация	Сырье, материалы	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата	Отчисления на социальные нужды	Итого без накладных расходов	Накладные расходы	Стоимость бюджета
16000	106,57	176548,3	26482,3	60909,2	280046,37	44807,4	324853,8

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется бюджет НИ «Исследование процесса синтеза гидрокарбонатных магниезиальных структур в водных условиях» по форме, приведенной в таблице 27. В таблице также представлено определение бюджета затрат двух конкурирующих научно-исследовательских проектов.

Таблица 27 – Расчет бюджета затрат НИИ

№	Наименование статьи	Сумма, руб.			Примечание
		Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2	
1	Материальные затраты НИИ	106,57	36285,9	29788,5	Пункт 4.3.1
2	Затраты на специальное оборудование	16000	18250	38750	Пункт 4.3.2
3	Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	176548,3	176548,3	176548,3	Пункт 4.3.3
4	Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	26482,3	26482,3	26482,3	Пункт 4.3.4
5	Отчисления во внебюджетные фонды	60909,2	60909,2	60909,2	Пункт 4.3.5
6	Накладные расходы	44807,4	50956,1	53196,5	Пункт 4.3.6
Бюджет затрат НИИ		<b>324853,8</b>	369431,8	385674,8	Сумма ст. 1- 6

#### 4.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Для определения эффективности исследования рассчитан интегральный показатель эффективности научного исследования путем определения интегральных показателей финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

#### 4.4.1 Интегральный показатель финансовой эффективности

Интегральный финансовый показатель разработки  $I_{\Phi}^p$ :

$$I_{\Phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}}, \quad (68)$$

где  $\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;  $\Phi_{max}$  – максимальная стоимость исполнения проекта.

Определим значения показателя для разрабатываемой технологии и аналогов, приведенных в пункте 4.1.1 данной работы:

$$I_{\Phi}^{\text{тек.пр.}} = \frac{\Phi_{\text{тек.пр.}}}{\Phi_{max}} = \frac{324853,8}{385674,8} = 0,84 \quad (69)$$

$$I_{\Phi}^{\text{исп.2}} = \frac{\Phi_{\text{тек.пр.}}}{\Phi_{max}} = \frac{369431,8}{385674,8} = 0,96 \quad (70)$$

$$I_{\Phi}^{\text{исп.3}} = \frac{\Phi_{\text{тек.пр.}}}{\Phi_{max}} = \frac{385674,8}{385674,8} = 1 \quad (71)$$

В результате расчета интегральных финансовых показателей по трем вариантам разработки вариант 1 (текущий проект) является более эффективным.

#### 4.4.2 Интегральный показатель ресурсоэффективности

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов выполнения НИР определен путем сравнительной оценки их характеристик, распределенных с учетом весового коэффициента каждого параметра (Таблица 28).

Таблица 28 – Сравнительная оценка характеристик вариантов НИР

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Исп.2	Исп.3
1. Прочность	0,20	4	5	4
2. Водостойкость	0,20	5	4	3
3. Технологичность	0,15	4	3	2
4. Энергосбережение	0,15	5	5	4
5. Материалоёмкость	0,3	5	4	4
ИТОГО	1	4,65	4,2	3,5

Расчет интегрального показателя для разрабатываемого проекта и аналогов:

$$I_{p1} = 4 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,3 = 4,65 \quad (72)$$

$$I_{p2} = 5 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,3 = 4,2 \quad (73)$$

$$I_{p3} = 4 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,2 + 2 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,3 = 3,5 \quad (74)$$

#### 4.4.3 Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки

Интегральный показатель эффективности разработки определяется по формуле:

$$I_1 = \frac{I_{p1}}{I_{\phi}^{p1}} = \frac{4,65}{0,84} = 5,54 \quad (75)$$

$$I_2 = \frac{I_{p2}}{I_{\phi}^{p2}} = \frac{4,2}{0,96} = 4,34 \quad (76)$$

$$I_3 = \frac{I_{p3}}{I_{\phi}^{p3}} = \frac{3,5}{1} = 3,5 \quad (77)$$

Сравнительная эффективность аналогов с проектом:

$$\mathcal{E}_{cp.2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{4,34}{5,54} = 0,78 \quad (78)$$

$$\mathcal{E}_{\text{ср.з}} = \frac{I_3}{I_1} = \frac{3,5}{5,54} = 0,63 \quad (79)$$

Сравнение полученных значений показателей приведено в таблице 29.

Таблица 29 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Текущий проект	Исп.2	Исп.3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,84	0,96	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,65	4,2	3,5
3	Интегральный показатель эффективности	5,54	4,34	3,5
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,78	0,63

Сравнение среднего интегрального показателя сопоставляемых вариантов позволило сделать вывод о том, что наиболее финансово- и ресурсоэффективным является вариант 1 (текущий проект). Наш проект является более эффективным по сравнению с конкурентами.

#### Выводы по главе 4:

В результате выполнения целей раздела можно сделать следующие выводы:

1. Результатом анализа конкурентных технических решений является выбор одного из вариантов реализации НИР как наиболее подходящего и оптимального по сравнению с другими.

2. В ходе планирования для руководителя и инженера был разработан график реализации этапа работ, который позволяет оценивать и планировать рабочее время исполнителей. Определено следующее: общее количество дней для выполнения работ составляет 105 дней; общее количество дней, в течение которых работал инженер, составляет 104 дня; общее количество дней, в течение которых работал руководитель, составляет 17 дней.

3. Для оценки затрат на реализацию проекта разработан проектный бюджет, который составляет 324853,8 руб.

4. Результат оценки эффективности ИР показывает следующие выводы:

- 1) значение интегрального финансового показателя ИР составляет 0,84, что является показателем того, что ИР является финансово выгодной по сравнению с аналогами;
- 2) значение интегрального показателя ресурсоэффективности ИР составляет 4,65, по сравнению с 4,2 и 3,5;
- 3) значение интегрального показателя эффективности ИР составляет 5,54, по сравнению с 4,34 и 3,5, и является наиболее высоким, что означает, что техническое решение, рассматриваемое в ИР, является наиболее эффективным вариантом исполнения.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СТУДЕНТА

1. Охлопкова А. В. и др. Применение термического анализа для определения фазового состава гидромагнезитовой породы //Проблемы геологии и освоения недр: труды XXI Международного симпозиума имени академика МА Усова студентов и молодых ученых, посвященного 130-летию со дня рождения профессора МИ Кучина, Томск, 3-7 апреля 2017 г. Т. 2.—Томск, 2017. – 2017. – Т. 2. – С. 409-411.

2. Старостин Н. М., Охлопкова А. В., Митина Н. А. Смешенные гидрокарбонатные цементы повышенной водостойкости //Современные технологии и материалы новых поколений: сборник трудов Международной конференции с элементами научной школы для молодежи, г. Томск, 9-13 октября 2017 г.—Томск, 2017. – 2017. – С. 334-335.

3. Охлопкова А. В., Митина Н. А. Твердение магниального вяжущего в воде //Высокие технологии в современной науке и технике (ВТСНТ-2018): сборник научных трудов VII Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, г. Томск, 26–30 ноября 2018 г.—Томск, 2018. – 2018. – С. 86-87.