

В. А. Гречухин  
Г. Д. Ляхевич

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
И МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ РЕМОНТА  
МОСТОВ И ТОННЕЛЕЙ

Минск  
БНТУ  
2021

УДК 691.3:666.972.16+625.745.1.089.2

ББК 39.112-07

Г81

**Гречухин, В. А.** Инновационные технологии и материалы для ремонта мостов и тоннелей / В. А. Гречухин, Г. Д. Ляхевич. – Минск: БНТУ, 2021. – 126 с. – ISBN 978-985-583-636-1.

В монографии рассмотрены вопросы получения гидрофобизирующе-кольматирующей добавки из вторичных продуктов производства минеральных масел и разработка с применением данной добавки бетонов для ремонта и восстановления защитного слоя железобетонных конструкций. Данные бетоны применены при капитальном ремонте опор и пролетных строений транспортных сооружений. Их нанесение производили штукатурным способом и методом торкретирования с применением торкрет-бетонных установок.

Монография предназначена для научных работников, преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов специальности «Мосты, транспортные тоннели и метророполитены» высших и средних специальных учреждений образования, а также для проектировщиков.

Табл. 37, ил. 49, библиогр. 76 назв., в т. ч. 31 собственных

Рекомендовано к изданию научно-техническим советом  
Белорусского национального технического университета  
(протокол № 1 от 22.01.2020 г.)

#### Рецензенты:

доктор технических наук *В. Н. Яромко*;

доктор технических наук *Я. Н. Ковалев*

ISBN 978-985-583-636-1

© Гречухин В. А.,

Ляхевич Г. Д., 2021

© Белорусский национальный  
технический университет, 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Перечень условных обозначений.....	6
ВВЕДЕНИЕ .....	7
ГЛАВА 1. СПОСОБЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ БЕТОНА.....	8
1.1. Влияние растворов противогололедных реагентов и агрессивных факторов окружающей среды на процесс коррозии бетона .....	8
1.2. Требования к материалам для ремонта мостов и путепроводов .....	13
1.3. Способы защиты железобетонных конструкций от коррозии .....	13
1.3.1. Гидрофобные и гидрофобизирующие добавки в цементные системы .....	15
1.3.2. Кольматирующие и глинистые добавки.....	19
1.3.3. Комплексные и пластифицирующие добавки .....	20
1.4. Перспективы получения и применения ремонтных бетонов .....	21
Выводы по главе 1 .....	27
ГЛАВА 2. ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ .....	28
2.1. Характеристика материалов, использованных в исследованиях .....	28
2.2. Методика исследований. Приборы и оборудование .....	30
2.2.1. Определение свойств органоминеральной добавки – отработанной глины нефтеперерабатывающих заводов .....	30
2.2.2. Определение физико-технических свойств цементного камня и бетона .....	33
2.2.3. Получение порошкообразного гидрофобного концентрата.....	37
2.3. Обработка результатов исследований .....	39
Выводы по главе 2 .....	40
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА И СВОЙСТВ ОТРАБОТАННОЙ ГЛИНЫ .....	41
3.1. Дериватографические исследования .....	43
3.2. Технический и элементный анализ.....	44
3.3. Физико-химические свойства добавки ОГ.....	47
3.4. Микроскопическое исследование добавки ОГ .....	51

3.5. Определение свойств органической массы.....	52
Выводы по главе 3 .....	59
<b>ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ И РЕМОНТНОГО БЕТОНА, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ДОБАВКОЙ ОТРАБОТАННОЙ ГЛИНЫ .....</b>	<b>61</b>
4.1. Моделирование и обработка результатов исследований.....	61
4.2. Способы введения добавки отработанной глины в цемент и получение порошкообразного гидрофобного концентрата.....	71
4.3. Технология введения органоминеральной добавки – отработанной глины нефтеперерабатывающих заводов в ремонтные бетоны .....	76
4.4. Исследование физико-технических свойств гидрофобного цемента .....	76
4.5. Влияние добавки отработанной глины нефтеперерабатывающих заводов на физико-технические свойства цементного теста.....	78
4.6. Влияние органоминеральной добавки отработанной глины на физико-технические свойства цементного камня .....	81
4.7. Влияние добавки отработанной глины на физико-технические свойства мелкозернистых ремонтных бетонов.....	88
4.8. Влияние органоминеральной добавки отработанной глины на физико-технические свойства ремонтных бетонов с крупным заполнителем.....	92
4.9. Влияние органоминеральной добавки отработанной глины на коррозионное состояние стальной арматуры .....	94
4.10. Основные факторы влияния органоминеральной добавки отработанной глины на цемент и ремонтные бетоны .....	96
Выводы по главе 4 .....	100
<b>ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРИГОТОВЛЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ РЕМОНТНЫХ БЕТОНОВ .....</b>	<b>103</b>
5.1. Технология приготовления и применения ремонтных бетонов с органоминеральной добавкой отработанной глины для восстановления защитного слоя железобетонных конструкций .....	103

5.2. Расчет экономической эффективности применения составов ремонтных бетонов с добавкой отработанной глины.....	114
Выводы по главе 5 .....	116
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	117
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	119

## ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ОГ – отработанная глина;

ОГМП – отработанная глина масляного производства;

ПГК – порошкообразный гидрофобный концентрат;

ОМ – органическая масса;

$W_m$  – водопоглощение бетона по массе, %;

$W$  – марка бетона по водонепроницаемости;

$R$  – прочность сцепления при отрыве материала от бетона, МПа;

$F$  – разрушающее усилие при отрыве материала от бетона, Н;

$A$  – площадь сечения образца при отрыве материала от бетона, мм<sup>2</sup>.

## ВВЕДЕНИЕ

В Республике Беларусь на автомобильных дорогах построено около 8000 мостов и путепроводов, более 100 тысяч водопропускных труб и другие бетонные и железобетонные транспортные сооружения. На них действуют агрессивные факторы окружающей среды, включая воздействие реагентов противогололедных материалов, которые при нарушении гидроизоляции конструкций ускоряют коррозию бетона и арматуры, уменьшая несущую способность конструкций. Действие этих факторов «усиливает» переменное замораживание – оттаивание, ускоряя процесс разрушения бетона, особенно в зоне переменного уровня воды. Через 10–15 лет эксплуатации в таких условиях снижается грузоподъемность мостов и путепроводов и без своевременного проведения ремонтно-восстановительных работ их безопасная эксплуатация становится невозможной.

В монографии представлены результаты, полученные при разработке технологии, составов и исследовании свойств ремонтных бетонов, имеющих повышенную эффективность за счет использования новой органоминеральной добавки, полученной из вторичных продуктов производства минеральных масел. Их переработка и применение, по разработанной технологии, позволяют получить эффективный ремонтный бетон для ремонта и восстановления защитного слоя железобетонных конструкций транспортных сооружений.

# ГЛАВА 1

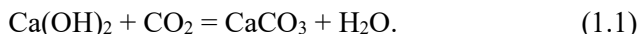
## СПОСОБЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ БЕТОНА

### 1.1. Влияние растворов противогололедных реагентов и агрессивных факторов окружающей среды на процесс коррозии бетона

Мосты и путепроводы подвергаются деструктивным воздействиям, вызванным нарушением технологии возведения и внешними природными и эксплуатационными факторами [1], что вызывает их преждевременное разрушение.

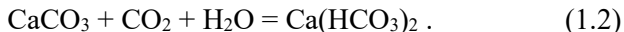
Диффузионные процессы выщелачивают известь из бетона и совместно с протекающими химическими реакциями приводят к деструктивным изменениям в бетоне конструкций [2].

Углекислый газ вызывает коррозию бетона и увеличение объема цементного камня:



Образовавшийся карбонат кальция ( $\text{CaCO}_3$ ) плохо растворим в воде, он откладывается в порах цементного камня, создавая растягивающие напряжения, растрескивание и разрушение.

Водные растворы кислот образуют в бетоне легкорастворимый бикарбонат кальция, который растворяется в воде и вымывается из структуры цементного камня:



В табл. 1.1 представлена градация степени разрушения бетона [3].



Таблица 1.1

## Степени повреждений бетона

Степени повреждений бетона	Внешние признаки	Прочность
1	Загрязнение поверхности, усадочные трещины, раковины и незначительная карбонизация	Высокая
2	Поверхность обветшала, шелушащаяся или раскрошившаяся с усадочными трещинами и небольшими сколами, малая степень карбонизации, наличие на поверхности выколов	Ниже проектной на 10–15 %
3	На поверхности появляется ржавчина и трещины неактивные шириной до 0,2 мм, образуются отдельные сколы, сильная карбонизация, визуально наблюдаемые, сплошные выколы	Ниже проектной на 15–20 %
4	Активные и неактивные трещины размером более 0,2 мм, многочисленные сколы, оголение арматуры, сильная карбонизация, продукты разрушения в виде сталактитов	Ниже проектной на 20 % и более
5	Оголенный и не прочно закрепленный заполнитель, открытая арматура, глубокие сколы, при простукивании молотком глухой звук, наличие пустот	Полная потеря в отдельных местах

Соли щелочных металлов натрия и калия повышают растворимость гидроксида кальция, ускоряют выщелачивание и образование сталактитов на железобетонных конструкциях (рис. 1.1).

Понижение температуры ускоряет растворимость гидроксида кальция (табл. 1.2). При температуре 0 °С скорость растворимости компонентов цементного камня максимальная, растворяются силикаты и алюминаты кальция, составляющие основной объем новообразований и придающие цементному камню прочность.



Рис. 1.1. Разрушение защитного слоя и коррозия арматуры

Таблица 1.2  
Влияние температуры на растворимость гидроксида кальция в воде

Температура, °С	80	60	40	30	20	10	0
Растворимость, г/л (в пересчете на CaO)	0,660	0,830	1,000	1,109	1,180	1,125	1,300

Процессы коррозии бетона условно делят на три вида (табл. 1.3).

Капиллярные силы и тепломассоперенос вызывают периодическое высыхание и увлажнение бетона защитного слоя, в результате происходит интенсивная миграция агрессивных реагентов и разрушение бетона [4].

Данную проблему решают повышением устойчивости бетона к воздействию агрессивных реагентов и своевременным проведением

ремонтно-восстановительных работ. Поэтому актуальна проблема поиска новых ремонтных материалов, которые дополняют или заменяют уже имеющиеся.

Таблица 1.3

Виды коррозии бетона

Виды коррозии	Воздействующие факторы	Происходящие процессы
Первый	Вода с малой временной жесткостью	Выщелачивание гидроксида кальция и других растворимых компонентов цементного камня, перенос их водой, снижение прочности бетона [5]
Второй	Обменные реакции между водой, содержащей химические вещества и компонентами цементного камня	Образование растворимых или нерастворимых соединений, снижение плотности структуры бетона. Реакция растворов противогололедных реагентов и углекислоты воздуха с гидроксидом кальция цементного камня. Карбонизация бетона, с уплотнением и повышением стойкости. Образование кислой среды в зоне контакта карбонизированного бетона и арматуры, ее интенсивная коррозия [5]
Третий	На цементный камень действуют водные среды, содержащие сульфаты	Рост кристаллов гипса и сульфалоюмината, увеличение объема твердой фазы. Рост внутренних напряжений, разрушение структуры бетона [5]

Значительный вклад в решение проблемы повышения устойчивости железобетона к воздействию агрессивных реагентов внесли отечественные и зарубежные ученые: Алексеев С. Н., Баженов Ю. М., Батраков Б. Г., Горчаков Г. И., Дворкин Л. И., Иванов Ф. М., Каприелов С. С., Москвин В. М., Полак Ф., Ратинов В. Б., Ребиндер П. А., Розенталь Н. К., Розинберг Т. И., Скрамтаев Б. Г., Соломатов В. И., Хигерович М. И. и другие. Они установили, что комплексные органоминеральные добавки улучшают физико-механические характери-

стики бетона и способность противостоять агрессивному воздействию окружающей среды.

Их работы содержат результаты исследований и рекомендации по снижению водопоглощения, повышению водонепроницаемости защитных и ремонтных слоев, повышению прочности сцепления материалов с ремонтируемой бетонной поверхностью. Однако для условий, характеризующихся многочисленными циклами замораживания и оттаивания поверхностных слоев бетона, эти технические решения не всегда дают положительный технический и экономический эффект.

Согласно данным, приведенным Косиновым Е. А., коррозия цементного камня зависит от плотности, коэффициента капиллярного водопоглощения, характеристик агрессивного реагента, параметров пор и краевого угла смачивания стенок капилляров агрессивными реагентами. Снизить скорость фильтрации коррозионно-активного раствора в цементный камень можно путем гидрофобизации капилляров [6].

Противогололедные реагенты проникают к стальной арматуре по порам и капиллярам, вызывая коррозию. Согласно расчетам, проведенным Розенталем Н. К., ее можно значительно уменьшить путем повышения плотности бетона. При снижении коэффициента диффузии кислорода в бетоне меньше  $1 \times 10^{-11}$  м<sup>2</sup>/с, а хлоридов меньше  $1 \times 10^{-13}$  м<sup>2</sup>/с коррозия вообще не развивается [7].

Комплексные добавки, включающие тяжелые минеральные масла, битумные эмульсии и бентонит, гидрофобизируют бетон и повышают его водонепроницаемость, препятствуя прониканию воды под давлением. Согласно исследованиям Рамачандрана В. С. и др. авторов, ультрадисперсные минеральные частицы с размерами 1–20 мкм снижают пористость цементной системы и уменьшают количество воды затворения бетонной смеси [8]. Они влияют на дифференциальную пористость цементного камня, характеризующуюся разной размерностью пор и неоднородностью их распределения в объеме. Размещаясь между частицами цемента, они формируют цементный камень с меньшими размерами капиллярных пор и высокодиспергированной капиллярной пористостью [9]. Их введение формирует плотную структуру цементного камня, улучшает прочностные характеристики, водо- и коррозионную стойкость бетона, уменьшает его водопоглощение и усадку [10].

Снижение количества и сечения открытых пор повышает защитную способность бетона к воздействию растворов солей [11]. Бетон с пониженной проницаемостью для агрессивных хлористых солей хорошо защищает стальную арматуру [12].

В бетоне движение воды идет по капиллярам с радиусом менее  $10^{-3}$  см. Одним из вариантов повышения водонепроницаемости цементного камня и бетона является кольматация капиллярных пор бентонитом, а снижение водопоглощения введением в бетонную смесь органических добавок [13].

## **1.2. Материалы, применяемые для ремонта мостов и путепроводов**

В соответствии с СТБ 1464 материалы для ремонтных работ должны иметь хорошую совместимость и прочность сцепления с ремонтируемым бетоном. Их прочность, водопоглощение, водонепроницаемость и морозостойкость не могут быть ниже остаточных характеристик, ремонтируемой бетонной конструкции.

Применение известных смесей сдерживает стоимость и то, что они не обеспечивают защиту конструкций.

Таким образом, несмотря на то, что проблема защиты бетонных и железобетонных конструкций от воздействия агрессивных реагентов существует давно, ее решение остается актуальным и в настоящее время.

## **1.3. Способы защиты железобетонных конструкций от коррозии**

Срок службы мостов и путепроводов значительно ниже проектного, что подтверждается значительным объемом капитальных ремонтов и реконструкции, проводимых на транспортных сооружениях Республики Беларусь. Многие из них были построены в 80-е годы и срок их эксплуатации не превышает 50 лет.

При выборе варианта защиты необходимо определить наиболее эффективный. Основные способы защиты бетонных и железобетонных конструкций от коррозии представлены в табл. 1.4.

Таблица 1.4

## Основные способы защиты конструкций

Способ защиты	Действие
Первичная	В бетонную смесь, «до» или «в» процессе изготовления, вводят добавки, повышающие устойчивость бетона к воздействию агрессивной среды
Вторичная	Поверхность бетонной конструкции защищают нанесением на нее изолирующего материала

Согласно данным Бусела А. В. и Матвейко Н. П. с учетом степени агрессивности среды защита железобетонных конструкций от коррозии может быть первичной или в сочетании со вторичной (табл. 1.5) [3].

Таблица 1.5

## Виды защиты бетонных и железобетонных конструкций от коррозии в зависимости от степени агрессивности среды

Степень агрессивности среды	Глубина разрушения поверхностного слоя, мм/год	Вид защиты конструкций от коррозии
Слабоагрессивная	До 0,4	Первичная защита
Среднеагрессивная	0,4–1,2	Сочетание первичной и вторичной защиты
Сильноагрессивная	> 1,2	Первичная и вторичная защита с применением материалов по специальному проекту

При всем многообразии технических решений, решающую роль в эффективности антикоррозионной защиты играет выбор системы защитных покрытий и материалов. Неверное решение может привести к разрушению поверхности бетонных и железобетонных конструкций даже в первый год эксплуатации. Большое значение имеет своевременное восстановление защитного слоя.

Классификация добавок по механизму действия на процессы твердения минеральных вяжущих веществ, проведенная Ратиновым В. Б. и Розенберг Т. И. [14] приведена в табл. 1.6.

Таблица 1.6

## Классификация добавок по механизму действия

Класс добавки	Наименование	Действие
Первый	Химически малоактивные электролиты	Влияют на кинетику гидратационного твердения. Повышают или понижают растворимость исходного вяжущего и конечных продуктов гидратации
Второй	Смолы и другие органические соединения	Распределяются в виде пленок и кольматируют поры. Повышают эластичность, водонепроницаемость и морозостойкость бетона

Основными путями увеличения срока безотказной эксплуатации мостов и путепроводов является совершенствование методов первичной и вторичной защиты, и разработка составов бетонных смесей для ремонта.

Батраков В. Г. доказал целесообразность введения в цементные системы добавок органических и неорганических соединений, имеющих гидрофильную головку и гидрофобный хвост [15].

### *1.3.1. Гидрофобные и гидрофобизирующие добавки в цементные системы*

Касторных Л. И. отмечает, что гидрофобизирующие добавки снижают количество и размер макропор цементного камня и придают им замкнутую правильную форму [16].

После затворения на поверхности цементных зерен образуется двойной электрический слой. В результате взаимного притяжения разноименных зарядов образуются флоккулы, которые повышают вязкость системы. На цементных зернах оболочками воды создаются стерические препятствия, которые увеличиваются адсорбирующимися молекулами ПАВ, замедляя гидратацию цемента. К гидратирующейся поверхности цемента хемосорбционно крепятся гидрофильные группы. Гидрофобные углеводородные радикалы, развернуты в сторону воды, отталкивая ее и изменяя процесс формирования структуры цементного камня. Адсорбция органических со-

единений на цементных зернах замедляет гидратацию на начальном периоде набора прочности. В цементном тесте образуются структурные элементы, повышающие прочность и плотность структуры цементного камня. Концентрация ПАВ на межфазных поверхностях раздела изменяет электрокинетический потенциал частиц, препятствуя слипанию и коагуляции [15].

Гидрофобные и гидрофобизирующие добавки, применяемые в строительстве для защиты железобетонных конструкций, представлены в табл. 1.7 и 1.8.

Таблица 1.7

Гидрофобные добавки

Вид и наименование добавки	Условная марка
Модифицированный олеат кальция	Церезит
Битумная эмульсия	Эмульбит

Таблица 1.8

Гидрофобизирующие добавки

Вид и наименование добавки	Условная марка	Нормативный документ
Фенилэтоксисилоксан	113–63 (ФЭС–50)	ТУ 6–02–995
Алюмометилсиликонат натрия	АМСР–3	ТУ 6–02–1171
Полигидросилоксаны	136–41 (ГКЖ–94) 136–157 <sub>м</sub> (ГКЖ–94М)	ТУ 6–09–52–83
Этилсиликонат натрия	ГКЖ–10	ТУ 18 РСФСР 409
Метилсиликонат натрия	ГКЖ–11	ТУ 6–02–995
Олеат натрия	Олеат натрия	-

Гидрофобизирующие добавки, в зависимости от назначения, делятся на три группы. По стойкости бетонных и железобетонных конструкций к внешним воздействиям они должны удовлетворять требованиям, приведенным в ГОСТ 24211 (табл. 1.9).



Таблица 1.9

Требования к стойкости бетона с гидрофобизирующими добавками

Вид добавки	Гидрофобизирующая		
	1 группы	2 группы	3 группы
Критерий эффективности добавки	Снижение водопоглощения бетона (через 28 суток испытания)		
	в 5 раз и более	в 2–4,9 раза	в 1,4–1,9 раза
Возможные дополнительные положительные или отрицательные эффекты	Снижение скорости тепловыделения, замедление схватывания и твердения бетона, снижение прочности бетона		

Основные теоретические положения о получении гидрофобного цемента и создании на цементных зернах адсорбционных гидрофобных пленок разработали Ребиндер П. А., Сегалова Е. Е. и др. При совместном помоле цемента и гидрофобизатора в мельницах, на цементных зернах образуются гидрофобные пленки, повышающие сроки сохранения активности. При затворении водой, благодаря сетчатому строению гидрофобная пленка пропускает водяные пары, одновременно замедляя гидратацию на начальном этапе. После раскрытия пленки гидратация равномерно происходит по всему объему бетонной смеси [17].

Горчаков Г. И. и Баженов Ю. М. отмечают, что поры, капилляры и микродефекты снижают прочность, долговечность и стойкость бетона. Они предлагают, для предотвращения доступа воды и агрессивных жидкостей, пропитывать железобетонные конструкции на глубину до 3 см разбавленными смолами, немодифицированными битумами и битумами, модифицированными синтетическими смолами [18].

Поверхностная пропитка высоковязкими веществами на основе нефтяных битумов и дегтей запирает капилляры, повышает стойкость бетонов. В результате их водопоглощение не превышает 1 %, морозостойкость составляет более 2000 циклов, а марка бетона увеличивается на 20–22 % [19].

Кузьменков М. И. и Куницкая Т. С. пишут, что пропитка бетона композициями на основе полимеров повышает водонепроницаемость и прочность. Водорастворимые полимеры, вводимые при пропитке или при объемной гидрофобизации на стадии изготовления бетонной конструкции, снижают микропористость и уменьшают размер пор радиусом  $100 \times 10^{-10}$  м. Основным недостатком метода пропитки является заполнение пор только защитного слоя. Внутренний объем бетонной конструкции при данном способе остается без защиты, при этом количество органического компонента, действующего на поверхностные слои бетонной конструкции, достигает десятков процентов от массы цементного камня, что может ускорить деструктивные процессы в бетоне [20].

В НИИЦемент (г. Подольск) разработана синтетическая добавка – раствор одной части высокомолекулярных жирных кислот в двух частях минерального масла, с использованием кубовых остатков СЖК. По прочности и срокам схватывания цемент с этой добавкой равноценен исходному цементу без поверхностно активных веществ.

Надежность и долговечность бетонных конструкций промышленных зданий и сооружений обеспечивают применением битумной эмульсии в качестве химической уплотняющей добавки [21].

Исследования, проведенные в НИИ Гипроцемент и в лаборатории стройматериалов ЛИСИ, доказали, что битумные эмульсии, введенные в бетонную смесь, повышают водонепроницаемость и морозостойкость, улучшают другие свойства бетона [22].

Согласно электронно-микроскопическим исследованиям Бушневой Е. Ю., битум в количестве 1,0–1,5 % от массы песка блокирует рост кристаллов гидратных фаз. Структура цементного камня уплотняется, вследствие изменения морфологии кристаллогидратов и частичного заполнения пор битумом, который снижает долю открытых пор, гидрофобизирует структуру цементного камня, уменьшает скорость фильтрации растворов. Общая пористость снижается на 18–41 %, а коэффициент капиллярного водопоглощения уменьшается до 0,04–0,11 кг/м<sup>2</sup>. Пленки битума снижают хрупкость бетона, повышают долговечность, деформативность и коррозионную стойкость. Жесткие кристаллизационные контакты между кристаллогидратами, частично заменяются подвижными коагуля-

ционными, повышая ударную прочность цементного камня в возрасте 28 суток до 3,9 Дж/м<sup>2</sup> [23].

Добавка для бетонных смесей и растворов, включающая 5–25 % битума, вводимая в виде гранул в количестве 0,6 % на месте выполнения работ, повышает прочность с 43,5 МПа до 60,3 МПа и время схватывания с 4,5 до 24 часов [24].

Соловьев В. И. установил, что добавки отходов нефтехимической промышленности повышают устойчивость бетона к воздействию агрессивных реагентов. На заводах по производству железобетонных конструкций Москвы, Алма-Аты, Караганды и др. было произведено более 300 тыс. м<sup>3</sup> бетона [25].

Основным отрицательным фактором, ограничивающим применение органических добавок, является то, что они не препятствуют прониканию жидкой агрессивной среды под давлением.

### *1.3.2. Кольматирующие и глинистые добавки*

Кольматирующие добавки перекрывают сечение пор и капилляров, создавая препятствие проникновению жидких реагентов в тело бетонной конструкции, повышают водонепроницаемость. Перечень наиболее распространенных кольматирующих добавок приведен в табл. 1.10.

Таблица 1.10

Кольматирующие добавки

Вид и наименование добавки	Условная марка
Хлорное железо	FeCl <sub>3</sub>
Силикаты натрия и калия	клей силикатный
Нитрат кальция (селитра кальциевая)	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>
Бентонит	бентонит

Набор прочности бетона сопровождается усадочными процессами, ускоряющимися с повышением температуры твердения. Бентонит снижает возникающие при этом напряжения, что особенно важно на начальных этапах, при этом последовательность физико-химических процессов остается без изменений [26].

Бентонит в количестве 0,1–10,0 % от массы цемента улучшает структурообразование бетона [26–29], повышает водонепроницаемость в 3–4 раза, снижает водопоглощение, капиллярный подсос, повышает стойкость к воздействию агрессивной среды [28], увеличивает плотность и снижает общую пористость [27]. Бентонит не изменяет последовательность происходящих при наборе прочности физико-химических процессов и благоприятно влияет на снижение напряжения, возникающего при повышении температуры твердения, особенно на начальном этапе.

Однако, применение чистого бентонита ограничено высокой стоимостью и значительным набуханием бентонита при увлажнении, что приводит к необходимости поиска других вариантов получения бентонита, отдавая предпочтение вторичным продуктам промышленных предприятий.

### *1.3.3. Комплексные и пластифицирующие добавки*

Для получения бетона, устойчивого к воздействию агрессивных реагентов, гидрофобизирующие и кольматирующие добавки совмещают или применяют в комплексе.

Комплексные добавки, представленные битумными эмульсиями и эмульсосуспензиями, повышают водонепроницаемость и долговечность конструкций.

Бентонит, модифицированный техническим углеродом, улучшает водоудерживающие и пластифицирующие характеристики штукатурного раствора [29]. Введение в бетонную смесь 5 % бентонита, модифицированного суперпластификатором, снижает капиллярную пористость, повышает водонепроницаемость до 0,9–1,4 МПа [30].

Добавка натриевого и кальциевого бентонита, вводимая с битумом, повышает водонепроницаемость бетона, придает ему водоотталкивающие свойства [31].

Вторичный продукт адсорбционной рафинации растительных масел, содержащий до 10 % жиров, повышает плотность цементного камня, изготовленного из цемента 24,0–26,0 % и песка 73,0–75,75 %, при В/Ц = 0,45–0,55 [32].

Анализ публикаций, проведенный Баженовым Ю. М. с соавторами, показал целесообразность применения вторичных продуктов производства для повышения плотности и прочности бетона. Авто-

ры предлагают разработать принципы создания нано- органиноминеральных модификаторов и рассмотреть основные закономерности их влияния на свойства бетонных смесей и бетона [33].

#### 1.4. Перспективы получения и применения ремонтных бетонов

Одной из задач, стоящих перед строительной отраслью, является долговременное содержание конструкций мостов и путепроводов в состоянии, позволяющем беспрепятственно пропускать нормативные нагрузки.

Обзор исследований отечественных и зарубежных литературных источников систематизирован и сведен в таблицы по основному влияющему фактору (табл. 1.11–1.13).

Таблица 1.11  
Влияние органических компонентов на цементные системы

Авторы, организации	Влияющий фактор	Качественное изменение
В. Москвин, Н. Розенталь	Снижение количества и уменьшение сечения открытых пор	Повышает защитную способность к воздействию агрессивных реагентов
М. Кузьменков, Т. Куницкая, Е. Чернышов, Д. Коротких	Органика	Гидрофобизирует, уменьшает количество крупных пор, закрывает сквозные поры и связывает излишки воды, препятствует комкованию цемента, снижает внутренние напряжения
РХТУ им. Д.И. Менделеев, НИИ Гипроцемент, ЛИСИ, ДНИСИ, МАДИ, П. Ребиндер, Е. Шитиков, Е. Бушнева, Г. Дибров, Н. Амосов	Битум и битумная эмульсия	Образуют коагуляционные контакты и повышают деформативность. Снижают водопоглощение и повышают водонепроницаемость

Окончание табл. 1.11

МИИТ, НИИЦемент, МГСУ, Е. Мануйлова, О. Попов	Техническое или отработан- ное масло	Снижает водопоглощение
Промтранспроект, В. Савенков, В. Чернявский	Ароматические углеводороды	Гидрофобизируют, заполняют поры бетона
СамГАСА, В. Соловьев, С. Коренькова, Л. Безгина	Отходы нефте- химической промышленно- сти	Повышают водонепроницаемость

Таблица 1.12

## Влияние неорганических компонентов на цементные системы

Авторы, организации	Влияющий фактор	Качественное изменение
В. Рамачандран, Р. Фельдман, М. Коллепарди, В. Бабков, А. Ольгинский	Ультрадисперсные минеральные частицы	Снижают пористость и формируют плотную структуру цементного камня
МИИТ, КазанИСИ, М. Мощанский, И. Гранковский, Е. Бондарь, М. Шумаков, Л. Дворкин и др.	Добавки бентонита и других глинистых минералов	Снижают водопоглоще- ние, повышают водонепроницаемость, морозостойкость и стойкость к воздей- ствию агрессивной среды, кольматируют капилляр- ные поры, снижают напряжения при наборе прочности бетона

Таблица 1.13

Совместное влияние органических и неорганических компонентов на цементные системы

Авторы, организации	Влияющий фактор	Качественное изменение
Е. Шитиков, Е. Ракитин, Л. Феднер, Г. Дибров, В. Мосиенко, В. Фоменко, Д. Фрумин	Комплексные добавки, включающие битум	Увеличивают прочность, снижают открытую пористость и водопоглощение, повышают водо-, морозо- и коррозионную стойкость
РХТУ им. Д.И. Менделеева, Е. Бушнева, Е. Косинов, М. Давидсон, Е. Кузьмин	Битум и инертный наполнитель бен-тонит или каолин	Повышают водонепроницаемость и морозостойкость, придают водоотталкивающие свойства
Ивановская государственная химико-технологическая академия	Отработанная глина, отход масложирового производства	Повышает плотность и прочность

Способность бетона противостоять воздействию агрессивных реагентов зависит от размера пор, плотности структуры и водоотталкивающих характеристик поверхности. Эти показатели можно улучшить, применяя разнообразные добавки [34]. Несмотря на большой выбор они имеют недостатки: недолговечность, токсичность, требования по соблюдению условий хранения, снижение прочности. Но основное, что их объединяет, это невысокая эффективность. Даже в безнапорных условиях, несмотря на высокие показатели по водонепроницаемости, происходит фильтрация воды через бетонные конструкции. Это подтверждается результатами многочисленных обследований, проведенных специализированными организациями (рис. 1.2–1.4).



Рис. 1.2. Разрушение плитного пролетного строения



Рис. 1.3. Разрушение балки пролетного строения





Рис. 1.4. Разрушение плитно-ребристого пролетного строения

Для придания бетону способности противостоять агрессивному воздействию окружающей среды, необходимо комплексное применение добавок.

Из вышеизложенного следует, что введение в бетонную смесь комплексных добавок улучшает физико-технические свойства бетона и повышает долговечность железобетонных конструкций.

В связи с этим актуально получение новой добавки, предпочтительно из вторичных продуктов производства, сочетающей в себе свойства гидрофобизирующих и кольматирующих добавок.

На нефтеперерабатывающих предприятиях при контактной очистке масла образуются вторичные продукты производства минеральных масел (отработанная глина масляного производства). Они не находят практического применения, что приводит к потере ценного сырья и загрязнению окружающей среды. Их «запасы» в районе Новополоцкого нефтеперерабатывающего предприятия составляют более 3,0 тыс. тонн [35, 36].

На основании анализа рассмотренных работ, вопросы формирования структуры цементного камня с добавкой ОГ представляют как научный, так и практический интерес. Однако для их внедрения в производственный процесс, необходимо исследовать свойства и разработать технологию введения в состав бетонной смеси.

Приведенный выше анализ состояния вопроса и соответствующие этому анализу заключения позволяют выдвинуть рабочую гипотезу. Она заключается в том, что введение добавки ОГ из вторичных продуктов производства минеральных масел должно изменить поровую структуру цементного камня, преобразуя крупные поры в более мелкие, придавая поверхности пор гидрофобные свойства и кольматируя их, что способствует снижению его водопоглощения и повышению водонепроницаемости.

Таким образом, целью настоящего исследования является разработка новых составов и технологии приготовления ремонтных бетонов, модифицированных органоминеральной добавкой из вторичных продуктов производства минеральных масел, для ремонта и восстановления защитного слоя железобетонных конструкций.

В соответствии с поставленной целью необходимо решить следующие основные **задачи**:

- исследовать состав и свойства вторичных продуктов производства минеральных масел;
- разработать технологию получения органоминеральной добавки отработанной глины из вторичных продуктов производства минеральных масел, исследовать ее свойства;
- разработать способ введения добавки отработанной глины в составы ремонтных бетонных смесей;
- исследовать физико-технические свойства ремонтных бетонов, модифицированных добавкой отработанной глины, экспериментально установить закономерности ее влияния на кинетику роста прочности, водопоглощение, водонепроницаемость, морозостойкость ремонтного бетона, прочность сцепления ремонтного бетона с бетоном ремонтируемых конструкций и влияние на коррозионное состояние стальной арматуры;
- осуществить производственную апробацию технологии приготовления и применения ремонтных бетонов, модифицированных добавкой отработанной глины.

## Выводы по главе 1

На основании проведенного анализа можно сделать вывод, что защитные характеристики бетона зависят от многих факторов, основными из которых являются размер пор, плотность и непроницаемость структуры, а также способность поверхности бетона (в частности стенок пор) «отталкивать» жидкие агрессивные реагенты. Для улучшения этих показателей используются разнообразные гидрофобные, гидрофобизирующие и кольматирующие добавки.

Совместное применение органических и неорганических добавок позволит повысить надежность защиты железобетонных конструкций, так как органические добавки придадут поверхности пор и капилляров гидрофобные свойства, а неорганические позволят перекрыть сечение пор и капилляров, кольматируя их.

Также следует принять во внимание тот факт, что бетоны, применяемые при строительстве мостов и путепроводов должны иметь водонепроницаемость не ниже W6 (ТКП 3-45.232). Однако результаты многочисленных обследований показывают, что вода проникает в конструкции даже в условиях безнапорной фильтрации, не смотря на высокие показатели бетона по водонепроницаемости.

На этом основании сделан вывод, что для повышения способности бетона противостоять агрессивному воздействию окружающей среды целесообразно комплексное применение органических и неорганических добавок [34]. Этим критериям соответствуют вторичные продукты производства минеральных масел, содержащие в своем составе минеральные и органические компоненты. Технология получения из них качественной органоминеральной добавки в ремонтные бетоны и изучение их свойств составляет содержание настоящей монографии.

## ГЛАВА 2 ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 2.1. Характеристика материалов, использованных в исследованиях

Для проведения экспериментов использовали цемент ПЦ 500–Д0, ОАО «Красносельскстройматериалы» без минеральных добавок, отвечающий требованиям ГОСТ 10178:

- нормальная густота цементного теста, % - 24,8;
- срок схватывания, ч-мин:
- начало – 2:15;
- конец – 3:10;
- истинная плотность,  $\rho_{ц}$ , г/см<sup>3</sup> – 3,17;
- тонкость помола (проход через сито №008), % – 93,5;
- величина удельной поверхности,  $S_{уд}$ , см<sup>2</sup>/г – 2900.

**Песок** природный карьера Черкассы для строительных работ по ГОСТ 8736, класс песка – высший, содержание пылевидных и глинистых частиц, определенное методом мокрого просева, по массе составляет 0,5 %, модуль крупности 2,46. Удельная эффективная активность естественных радионуклидов – 54 Бк/кг, насыпная плотность – 1,6 г/см<sup>3</sup>. Гранулометрический состав песка приведен в табл. 2.1.

Таблица 2.1  
Гранулометрический состав песка (навеска 1 кг)

Фракция	5–2,5	2,5–1,25	1,25–0,63	0,63–0,315	0,315–0,14	менее 0,14
Остаток, г.	90	95	240	350	210	15 (10+5)
Частный, %	9,0	9,5	24,0	35,0	21,0	1,5
Полный, %	9,0	18,5	42,5	77,5	98,5	100,0

**Щебень** из плотных горных пород для строительных работ фракции 5–10 мм и 10–20 мм производства РУПП «Гранит» г. п. Микашевичи Брестской области, соответствующий требованиям ГОСТ 8267. Гранулометрический состав щебня приведен в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Гранулометрический состав щебня

Наименование показателя	Значение					
	25	12,5	5	2,5	1,25	менее 1,25
Сито №	25	12,5	5	2,5	1,25	менее 1,25
Остаток, г.	115	3685	5680	325	25	170 (75+95)
Частный, %	1,15	36,85	56,80	3,25	0,25	1,70
Полный, %	1,15	38,10	94,80	98,05	98,30	100

**Вода.** Для приготовления бетонных смесей использовалась водопроводная вода, которая соответствует требованиям СТБ 1114 и не содержит примесей, препятствующих нормальному схватыванию и твердению цемента.

**Органоминеральная добавка отработанной глины** – получена из вторичных продуктов производства минеральных масел Новополоцкого нефтеперерабатывающего предприятия. Проведен анализ ее состава и определены физико-химические характеристики. Исследования проводили по СТБ 1112 и по методикам, описанным в работах [37–42]. Эффективность добавки ОГ определяли по ГОСТ 30459.

**Составы ремонтных бетонных смесей** – разработаны на основании требований ГОСТ 30459 и СТБ 1464, а также с учетом данных о составах, применяемых ОАО «Мостострой».

Состав мелкозернистого бетона: 530 кг цемента и 1600 кг песка на 1 м<sup>3</sup> смеси. Тяжелые бетоны: 410 кг цемента, 680 кг песка и 1150 кг щебня на 1 м<sup>3</sup> смеси.

При изготовлении образцов количество добавки ОГ изменяли ступенями 0/ 0,2/ 0,5/ 1,0/ 1,5/ 2,0/ 3,0/ 4,0 % от массы цемента, водоцементное отношение в интервале В/Ц = 0,4–0,5 с шагом 0,05.

Количество серий образцов для каждого испытания равнялось количеству ступеней изменения количества добавки ОГ. В некоторых сериях отдельные ступени были пропущены.

## **2.2. Методика исследований. Приборы и оборудование**

Для исследования характеристик вторичных продуктов производства минеральных масел и изучения возможности их использования в качестве добавки в бетонные смеси были подготовлены пробы. Первая отобрана немеханизированным способом «с установки контактной очистки масла» (непосредственно с фильтра очистки), а вторая отобрана точечным способом из поверхностных и глубинных слоев «с мест хранения в Полоцком регионе». Их транспортировку осуществляли в пластиковых ведрах с широкой горловиной емкостью 30 литров, которые складировали в крытом не отапливаемом помещении.

### *2.2.1. Определение свойств органоминеральной добавки – отработанной глины нефтеперерабатывающих заводов*

Физико-химические свойства являются важнейшим показателем, разрабатываемой добавки. Они дают возможность прогнозировать характеристики, составов бетонных смесей и корректировать состав добавки. Также появляется возможность поиска составов, аналогичных составу предлагаемой добавки.

Соотношение органической и минеральной составляющих определяли путем сжигания навески вторичных продуктов производства минеральных масел в муфельной печи, при температуре  $800 \pm 25$  °С. Остаток после сжигания взвешивали, рассчитывали в процентах к массе исходной навески в абсолютно сухом состоянии и обозначали А<sup>с</sup>.

Термическую стабильность добавки ОГ регистрировали на высокочувствительной термографической установке. Масса исследуемой навески составила 0,452 г, скорость повышения температуры в парогазовоздушной атмосфере 8 °С в минуту, конечная температура 600 °С, чувствительность записи дериватографа по кривым ДТА и ДТГ равнялась 1/5. В качестве эталона использовался оксид алюминия.

Для исследований использовали усовершенствованные и отработанные методики. Например, истинную плотность добавки ОГ определяли с использованием дизтоплива вместо воды.

При техническом и элементном анализе определяли влажность, зольность, серу (общую), летучие в процентах к массе навески отработанной глины. Влагу определяли по методу Дина и Старка, и пересчитывали на аналитическую пробу.

Показателем сернистости отработанной глины является общая сера, выражающая ее суммарное состояние и пересчитанная на аналитическую пробу  $S^a_{\text{общ}}$ . Для определения содержания общей серы все, содержащиеся в ней, виды серы превращали в сульфаты, и количественно определяли ее в виде сульфата бария. Определение общей серы осуществляли путем прокаливания навески со смесью, состоящей из одной части соды и двух частей окиси магнезия. Образующиеся при прокаливании сернистые металлы, окисляли до сульфатов и осаждали в солянокислом растворе хлористым барием. Количество полученного сернокислого бария определяли путем взвешивания (метод Эшка).

Выход летучих веществ определяли нагреванием навески отработанной глины без доступа воздуха при температуре  $850 \pm 25$  °С в течение семи минут и взвешивали после охлаждения остатка. Затем определяли разность между общей потерей массы ОМ и потерей массы, происходящей за счет испарения влаги, содержащейся в исходной навеске добавки ОГ.

Общее содержание углерода и водорода, определяли сжиганием добавки ОГ в среде кислорода и количественным учетом, образовавшихся при горении, водяных паров и углекислого газа. Из полученных количеств углекислого газа и воды вычисляли содержание углерода и водорода в пересчете на горючую массу.

Содержание органической серы в горючей массе ( $S_{\text{орг}}$ ) определяли расчетным путем, с использованием данных по содержанию серы, влаги и зольности в аналитической пробе добавки ОГ.

Азот в добавке ОГ определяли методом Кьельдаля, путем окисления ОМ, кипящей концентрированной серной кислотой, до двуокиси углерода и воды. В результате азот превращается в аммиак, который реагирует с избытком серной кислоты. Содержание азота пересчитывали на ОМ, а кислород в ней определяли по разности.

Термографические и термогравиметрические исследования добавки ОГ проводили по методике Л.Г. Берга. Кривые ДТА, ДТГ и ТГ регистрировали на высокочувствительной термографической установке. Скорость нагрева составляла 10 °С/мин, навеска добавки ОГ 500 мг.

Рентгенографические исследования проводили на дифрактометре ДРОН-1, излучение  $\text{CuK}_\alpha$ ,  $\text{CoK}_\alpha$  со скоростью вращения счетчика 1 и 2 оборота в минуту. Вращение со скоростью 1 оборот в минуту, дает возможность более четкого определения индивидуальных гидратных фаз. Образцы на рентгеноструктурный анализ и на ДТА готовили по общепринятой методике.

Определение удельной поверхности твердых тел, наряду со статическими адсорбционными методами, производили с использованием динамического метода тепловой десорбции.

В исследованиях, для повышения точности измерений, в качестве адсорбата вместо азота применяли аргон. Его применение продиктовано тем, что, при одинаковых относительных давлениях, он адсорбируется из смеси с меньшей концентрацией адсорбата 1,5–8,0 %, чем азот 5,0–25,0 %. Благодаря этому уменьшаются ошибки, связанные с колебанием нулевой линии катарометра и отклонением от линейной зависимости между сигналом катарометра и концентрацией адсорбата в смеси. Кроме этого, аргон имеет наименьшую молекулу из газов, обычно применяемых для определения поверхности (азот, криптон, ксенон, аргон), и малочувствителен к химической природе поверхности.

В ходе проведения эксперимента, в обогреваемую колонку загружали около 500 г добавки ОГ и нагревали до  $45 \pm 5$  °С. В верхнюю часть колонки, через дефлегматор вводили бензол. Снизу колонки отводили в приемник десорбат (органическую массу и растворитель). После отгонки бензола и продувки азотом, ОМ использовали для исследований. Расход десорбента (бензола) составил пять объемных частей на одну объемную часть добавки ОГ. После выделения ОМ остаток нагревали до  $105 \pm 5$  °С и, для более полного удаления бензола, в течение 60 мин продували при этой же температуре инертным газом – азотом.

Групповой химический состав ОМ определяли на колонке с крупнопористым силикагелем марки КСК (фракция 0,25–0,50 мм) [38]. Предварительно силикагель промывали горячей дистиллиро-



ванной водой с последующей сушкой в течение 6 часов при температуре 105 °С и 6 часов при 160 °С. Для работы использовалась стеклянная колонка диаметром 35 мм и высотой 1500 мм. Для десорбции углеводов и смол применяли смеси петролейного эфира и бензола в разных пропорциях. Растворители отгоняли от углеводородной фракции и смол на водяной бане.

Структуру углеводов ОМ изучали методом ИК спектроскопии [42]. Спектры снимали на универсальном спектрофотометре UR-20 в интервале частот 700–3600 см<sup>-1</sup>.

Кислородосодержащие функциональные, группы ОМ определяли по методике [39]:

– карбоксильные группы определяли потенциометрическим титрованием 0,05 н. раствором КОН, органической массы, растворенной в спиртобензольной смеси (1/3), до рН 10;

– сложноэфирные группы – путем прибавления к ОМ 0,1 н. спиртового раствора КОН. Смесь кипятили 18 ч, затем к смеси приливали 20 мл 0,1 н. титрованного спиртового раствора HCl и титровали при постоянном перемешивании в 0,1 н. спиртовом растворе КОН до рН 10 [41];

– карбонильные группы – путем смешения ОМ с 10 мл этанола и 2 мл водно-спиртового раствора солянокислого гидроксилamina; смесь кипятили 18 ч с последующим охлаждением до комнатной температуры и добавлением 20 мл воды, а затем титровали потенциометрически 0,1 н. водным раствором КОН до рН 3,5;

– гидроксильные группы с использованием пиридина; титрование раствора ОМ проводили 0,1 н. водным раствором КОН до рН 10.

## *2.2.2. Определение физико-технических свойств цементного камня и бетона*

Определение нормальной плотности и времени схватывания цементного теста проводили по СТБ ЕН 196–3–2000 часть 3 с использованием прибора Вика.

Консистенцию ремонтного состава, применяемого для восстановления защитного слоя, определяли по распылу конуса на стеклянном диске встряхивающего столика. Состав готовили с применением песка Вольского месторождения.

Подбор состава бетонных смесей производили по СТБ 1182, а приготовление бетонной смеси осуществляли согласно СТБ 1035 и СТБ 1545. Прочностные характеристики бетона определяли на образцах кубах, с размером ребра 100 мм в расчетном возрасте в соответствии с требованиями ГОСТ 10180.

Виброобработку проводили на лабораторной виброплощадке с частотой колебаний  $\nu = 50,0$  Гц и амплитудой  $A = 0,5$  мм.

Водопоглощение ( $W_m$ ) определяли на 5-и образцах, а водонепроницаемость ( $W$ ) – с использованием прибора «Агама-3», на цилиндрах диаметром и высотой 150 мм, по шесть штук в каждой серии в соответствии с требованиями ГОСТ 12730.

Морозостойкость бетона определяли по ГОСТ 10060 по первому методу, в водной среде. Бетонные образцы кубы с размерами ребра 100 мм выдерживали в камере нормального твердения в течение 28-и суток. После достижения бетоном проектного возраста их попеременно замораживали в холодильной камере при температуре от  $-15$  °С до  $-20$  °С и оттаивали в воде при температуре  $15-20$  °С. Контрольные образцы, в течение аналогичного периода времени, хранили в камере нормального твердения.

Прочность сцепления ремонтного бетона с бетоном конструкций определяли в соответствии СТБ 1464. Для испытания использовали машину с максимальной силой 10 кН, штангенциркуль, цилиндр стеклянный мерный, вместимостью 500 см<sup>3</sup> и весы лабораторные. Испытания проводились при температуре воздуха  $20 \pm 5$  °С и относительной влажности  $70 \pm 20$  %.

Для испытаний готовили образцы-кубы размером  $70 \times 70 \times 70$  мм, которые до достижения возраста 28 суток помещали в ванну с гидравлическим затвором. После чего, их трое суток хранили в закрытом помещении, при температуре воздуха  $\sim 20$  °С и относительной влажности  $\sim 70$  %. На следующем этапе образцы на 1 ч погружали обработанной гранью в воду. Затем на эту грань ставили металлическое кольцо и с помощью шпателя в один прием заполнили ремонтным бетоном со штыковкой по окружности 5–7 раз, а образовавшиеся излишки смеси срезали ножом. Подготовленные образцы в течение 1–3 суток хранили в ванне с гидравлическим затвором при температуре  $\sim 20$  °С и относительной влажности 90–100 %. После извлечения из ванны кольца сняли, и образцы поместили в ванну с гидравлическим

затвором еще на 28 суток. Затем эпоксидным клеем к их поверхности стороной с насечками были приклеены металлические диски.

Испытания проводили на разрывной машине, равномерно нагружая со скоростью не более 0,05 МПа/с. За величину прочности сцепления ( $R$ , МПа) ремонтного бетона с бетоном конструкции принято среднее арифметическое результатов испытаний трех образцов, с точностью до 0,01 МПа.

Влияние добавки ОГ на коррозию стальной арматуры, применяемую в железобетонных конструкциях, определяли по изменению массы стержней из стали класса S240, диаметром 10 мм, а также из термомеханически упрочненной стали класса S500, диаметром 25 мм с предварительно обработанной калибровкой поверхности. Для этого кубы, прошедшие испытание на прочность, дробили на мелкие куски и перетирали ступкой. Полученный состав просеивали через сито № 8, отделяя крупный заполнитель. После смешивания полученного порошка с водой в полученную пасту погружали оцилиндрованные и взвешенные заготовки арматуры, которые периодически доставали, промывали водой, очищали от следов коррозии и взвешивали. По потере массы определяли уменьшение площади поперечного сечения арматурных стержней.

Оптическую микроскопию образцов цементного теста проводили с помощью комплекта телевизионного микроскопа «Телемик-1», который представлен на рис. 2.1.



Рис. 2.1. Система видеонаблюдения «Телемик-1»

Микроскоп предназначен для углубленных исследований микрофрагментов в излучении видимого диапазона с применением стереоскопического микроскопа МБС–10, штатных осветителей, кольцевого волоконного осветителя и телевизионного канала наблюдения, включающего цветную телекамеру и цветной малогабаритный ЖК монитор.

Электронную микроскопию среза цементного камня проводили с использованием компактного сканирующего электронного микроскопа «Vega II LMU» чешской компании «Tescan» с управлением через персональный компьютер, с энергодисперсионной приставкой для элементного микроанализа.

Для исследования структуры и состояния поверхности цементного камня были изготовлены образцы размерами  $10 \times 10 \times 20$  мм без нанесения токопроводящих покрытий на исследуемую поверхность. Для проведения исследований, в зависимости от формы и размера, они закреплялись или в металлических оправках, которые представлены на рис. 2.2, или крепились на токопроводящий двухсторонний скотч. В работе проведено исследование как наружной поверхности образца, так и его излома. Перед началом испытаний образцы очищались от пыли методом обдува.



Рис. 2.2. Металлические оправки для закрепления образцов

Исследование структуры проводили с использованием BSE – детектора (детектора обратно-отраженных электронов) сканирующего электронного микроскопа «Vega II LMU» при увеличении от 100 до 10000 крат (рис. 2.3). Данная модель позволяет работать не только с высоким, но и с переменным вакуумом в камере и имеет техническую возможность исследовать непроводящие образцы в их естественном состоянии, без напыления токопроводящего слоя.



Рис. 2.3. Сканирующий электронный микроскоп «Vega II LMU» с BSE-детектором

Размер структурных составляющих образцов определяли с использованием специализированного программного обеспечения сканирующего электронного микроскопа.

### *2.2.3. Получение порошкообразного гидрофобного концентрата*

Порошкообразный гидрофобный концентрат (далее – ПГК), получали двумя способами. По первому – добавку ОГ и цемент совместно смешивали в высокоскоростной мешалке (рис. 2.4).

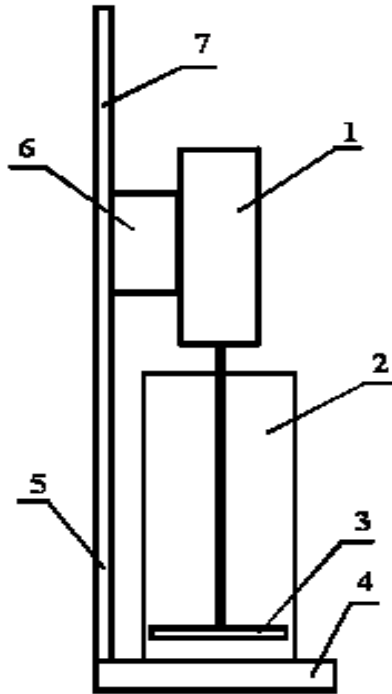


Рис. 2.4. Схема высокоскоростной мешалки,  
 для получения порошкообразного гидрофобного концентрата:  
 1 – электродвигатель; 2 – емкость с крышкой; 3 – лопасти мешалки;  
 4 – станина штатива; 5 – штанга штатива; 6 – крепежное устройство

Для предотвращения разбрасывания компонентов емкость при смешивании ПГК закрывали крышкой. Вращательное движение от электродвигателя на лопасти мешалки передавали через ось. Для смешивания использовали спиралеобразный стальной стержень. Электродвигатель крепили на штативе с устойчивой опорой. Взаимное перемещение лопастей и смешиваемых компонентов относительно друг друга осуществлялось двумя способами. При первом электродвигатель перемещали вдоль штатива вверх и вниз. При втором способе перемещали емкость с ПГК. Перемещение емкости с наклоном облегчало смешивание компонентов, находящихся в емкости.

Продолжительность смешивания, измеряемая секундомером, составляла от 30 секунд до 3,0 минут, скорость вращения – 500–1000 об/мин. В результате смешивания получали ПГК, по внешнему виду представляющий из себя темно-серый порошок.

По второму способу добавку ОГ и цемент смешивали на бегунах смесительных (рис. 2.5), загружая во вращающийся лоток 1–2 кг компонентов.



Рис. 2.5. Получение порошкообразного гидрофобного концентрата на бегунах смесительных

Полученные составы ПГК просеивали через сито. Порошкообразный гидрофобный концентрат, полученный по второму способу на смесительных бегунах, вводили в бетонную смесь при определении осадки конуса. В остальных случаях, для проведения испытаний, использовали порошкообразный гидрофобный концентрат, полученный по первому способу.

### **2.3. Обработка результатов исследований**

В работе исследовано влияние водоцементного отношения, количества добавки ОГ и количества цемента на водопоглощение ремонтного бетона. При данном числе влияющих факторов выбран трехфакторный план второго порядка, что обусловлено существен-

ными нелинейными свойствами объектов исследований и каждый фактор изменяется минимум на трех уровнях.

При проведении экспериментальных работ выполнена статистическая обработка полученных результатов:

## **Выводы по главе 2**

1. Применение современных методов исследований: дифференциально-термического, оптического и электронного микроскопического анализа, ИК-спектроскопии, стандартных методик определения свойств добавки, бетонных смесей и бетонов с использованием сертифицированного, поверенного оборудования, позволило изучить состав, структурные особенности и свойства сырьевых материалов, а также физико-технические характеристики полученного ремонтного бетона и установить закономерности влияния органоминеральной добавки отработанной глины на его структуру и свойства.

2. Органоминеральную добавку отработанной глины в ремонтные бетонные смеси вводили по разработанному двухступенчатому способу в составе порошкообразного гидрофобного концентрата, что обеспечило равномерное распределение в объеме бетона, а в результате и однородность структуры с высокими качественными характеристиками ремонтного бетона.

3. Применение современного высокотехнологичного оборудования, научно обоснованных методик, нормативной документации на исходное сырье и методы исследований, использование требуемого количества образцов, повторных испытаний и методов математической статистики при обработке данных, позволило свести к минимуму ошибки, влияющие на проведение эксперимента, и обеспечить достоверность полученных при этом результатов.

Эта цель достигнута тем, что на первой ступени готовили порошкообразный гидрофобный концентрат – смесь цемента с откорректированной органоминеральной добавкой отработанной глины в соотношении: 1,0 / (0,75–1,0) по массе, получаемый путем интенсивного смешивания, при котором высокомолекулярные соединения, содержащиеся в добавке ОГ, адсорбционно связываются с поверхностью клинкерных минералов цемента, что обеспечивает на второй ступени – равномерное распределение добавки ОГ в объеме ремонтной бетонной смеси.



### ГЛАВА 3

## ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА И СВОЙСТВ ДОБАВКИ ОТРАБОТАННОЙ ГЛИНЫ

В работе исследованы свойства органоминеральной добавки из вторичных продуктов производства минеральных масел, образующихся на нефтеперерабатывающих заводах в результате контактной очистки. Они представляют собой высокодисперсный материал, содержащий углеводороды с короткими боковыми цепями, способствующими образованию пространственных структур. Процесс получения минеральных масел схематично представлен на рис. 3.1.



Рис. 3.1. Основные процессы переработки нефти

Сочетание компонентов вторичных продуктов производства минеральных масел, а именно органической массы и бентонита, позволяет прогнозировать возможность получения на их основе новой добавки в ремонтные бетоны. Выше перечисленные компоненты являются гидрофобизирующим и кольматирующим. Их введение должно положительно повлиять на физико-технические характеристики ремонтного бетона, а именно улучшить показатели по водопоглощению, морозостойкости, водонепроницаемости и прочности сцепления с ремонтируемой бетонной поверхностью

Однако, для уточнения этих предположений необходимо исследовать физико-химические свойства органоминеральной добавки из вторичных продуктов производства минеральных масел.

В работе исследованы образцы «с установки контактной очистки масла» (рис. 3.2) и «с мест хранения в Полоцком регионе».



Рис. 3.2. Образцы вторичных продуктов производства минеральных масел

Отбор образцов вторичных продуктов производства минеральных масел «с мест хранения в Полоцком регионе» производили после снятия поверхностных слоев, загрязненных инородными включениями.

Следует отметить, что все образцы вторичных продуктов производства минеральных масел, нагретые в муфельной печи, по количеству органической массы соответствовали вышеуказанным параметрам (~45 % от общей массы вторичных продуктов производства минеральных масел). Условно образцы обозначили следующим об-

разом: ОГ–1 – «с установки контактной очистки масла» и ОГ–2 – «с мест хранения в Полоцком регионе».

### 3.1. Дериватографические исследования

При исследовании термографических и термогравиметрических характеристик установлено, что начало активного разложения наблюдается при температуре 285 °С (образец ОГ–1) и 312 °С (образец ОГ–2). Основная потеря массы отмечена при температуре 423–486 °С (образец ОГ–1) и 495–576 °С (образец ОГ–2). В области активной деструкции ОМ на кривых ДТА отмечены экзо- и эндоэффекты. Для образца ОГ–1 – экзоэффекты при температуре 362 °С и 480 °С и эндоэффекты при 285 °С и 423 °С. А для образца ОГ–2 экзоэффекты на кривой ДТА – при температуре 312 °С и 534 °С, а эндоэффекты при 93, 367, 495 и 576 °С (рис. 3.3).

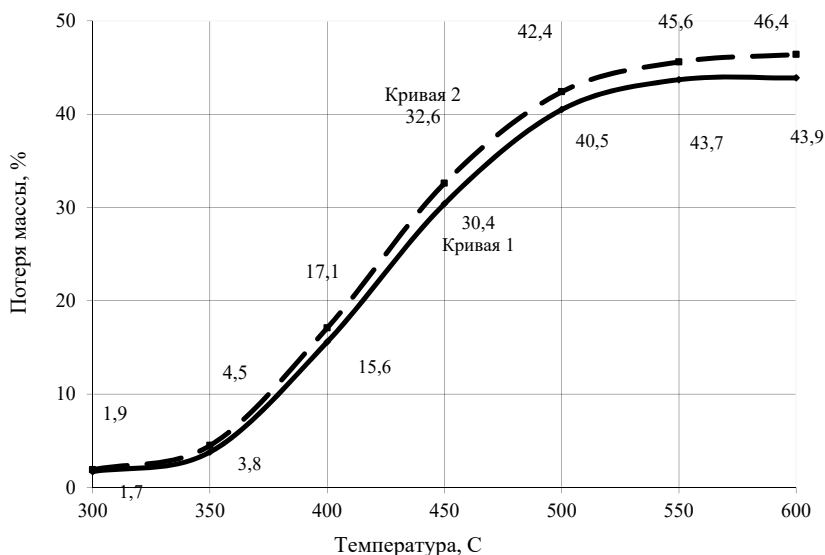


Рис. 3.3. Дериватографическое исследование добавки ОГ:  
 1 – образец ОГ–1 с установки контактной очистки масла;  
 2 – образец ОГ–2 с мест хранения в Полоцком регионе

Кривые потери массы (ТГ), дифференциально-термического анализа (ДТА) и деривативной термогравиметрии (ДТГ) для добавки ОГ представлены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Термогравиметрическая и термографическая  
характеристики добавки ОГ

Наименование		Показатели	
		образец ОГ–1	образец ОГ–2
ДТА максимальная температура, °С	эндоэффекты	285, 423	93, 367, 495, 576
	экзоэффекты	362, 486	312, 534
ДТГ температура экстремумов, °С		435	495

Небольшие значения экзоэффектов обусловлены преобладающими реакциями синтеза молекул за счет активных фрагментов, образующихся в процессе распада ОМ. С другой стороны, эндоэффекты на кривых ДТА показывают, что параллельно с реакциями синтеза протекают реакции распада молекул ОМ. Максимальная потеря массы добавки ОГ наблюдается при температуре 600 °С, в частности для образца ОГ–1 она составляет 43,9 %, а для образца ОГ–2 – 46,4 %, что соответствует количеству содержащейся в ней органической массы.

Удельная поверхность неорганической части добавки ОГ составляет 20000–30000 см<sup>2</sup>/г. Следует отметить термическую стабильность ее неорганической части и отсутствие в условиях эксперимента экзо- и эндо- эффектов.

### 3.2. Технический и элементный анализ

Результаты исследований структурного строения, химического и вещественного состава и свойств образцов, органоминеральной добавки ОГ, изготовленных из вторичных продуктов «с установки контактной очистки масла» (ОГ–1) и «с мест хранения в Полоцком регионе» (ОГ–2), представлены в табл. 3.2.

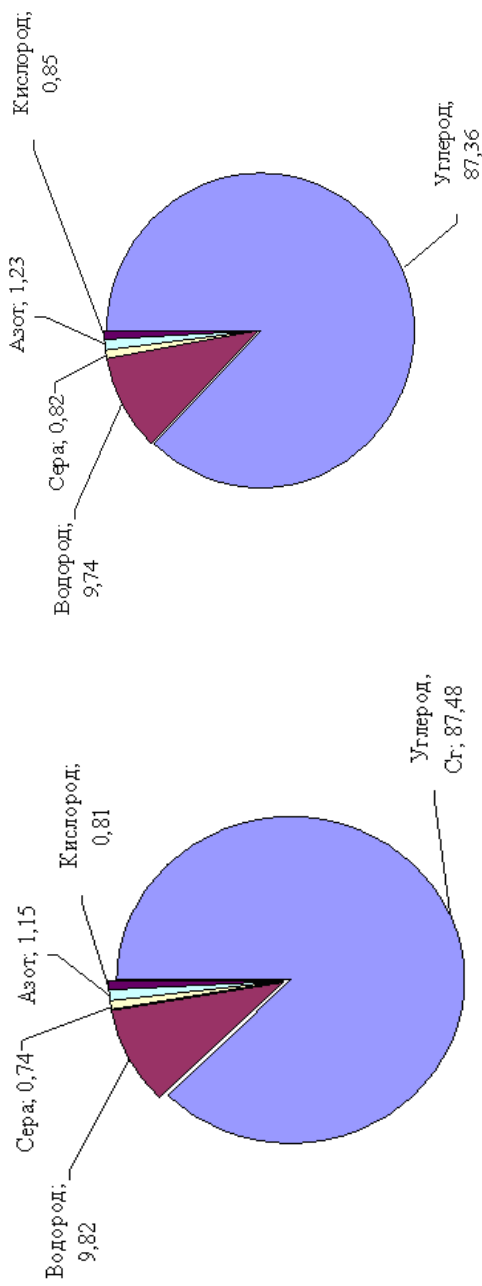
Таблица 3.2

Результаты технического анализа добавки ОГ

Наименование показателей		Показатели	
		образец ОГ–1	образец ОГ–2
Технический анализ, % по массе:	влажность, $W^a$	1,43	0,96
	зольность, $A^c$	61,85	59,12
	сера, $S^a_{\text{общ}}$	0,34	0,37
	летучие, $V^r$	42,45	43,70
Атомное отношение Н/С		1,347	1,338

Бентонит сорбировал высокомолекулярные органические соединения с относительно низким содержанием водорода (см. табл. 3.2 и рис. 3.4). Необходимо отметить более высокую зольность образца ОГ–1 при более низких значениях содержания серы и летучих. Низкая влажность объясняется высокой гидрофобностью добавки ОГ.

По результатам элементного анализа (см. рис. 3.4) следует отметить высокое содержание углерода 87,36–87,48 % и водорода 9,74–9,82, которые влияют на полярность поверхности контакта ремонтного бетона с бетоном восстанавливаемой конструкции, увеличивая прочность сцепления между ними.



*a* – образец ОГ-1

*б* – образец ОГ-2

Рис. 3.4. Элементный анализ образцов ОГ (по массе), %

### 3.3. Физико-химические свойства добавки ОГ

В табл. 3.3. представлены физико-химические свойства добавки ОГ. При исследуемых соотношениях с водой, она образует суспензию и при 20 °С практически не набухает.

Таблица 3.3  
Физико-химические свойства добавки ОГ

Наименование показателей	Показатели	
	образец ОГ–1	образец ОГ–2
Внешний вид	рассыпчатая, цвет от светло-желтого до темно-коричневого	комковатая, цвет неравномерный темно-коричневый
Истинная плотность, г/см <sup>3</sup>	1,85	1,89
Набухание в воде при температуре 20 °С	не набухает	
Образование водной суспензии при соотношении вода: добавка ОГ, в масс. частях: 1,0:0,1; 1,0:0,5; 1,0:1,0; 0,5:1,0	образуется при механическом перемешивании	
Растворимость в воде при $t = 20$ °С	не растворяется, всплывают отдельные частицы	
Водопоглощение, % масс.	9,4	8,3
Поверхностное натяжение на границе воздух – добавка ОГ, Дж/м <sup>2</sup>	0,014	0,027
Относительная концентрация парамагнитных центров: интенсивность сигналов		
$I$	154	168
$I/I_0$	0,82	0,91

Согласно СТБ 1464, добавку ОГ исследовали на соответствие требованиям пожарной безопасности.

Для определения негорючести, в соответствии с требованиями ГОСТ 12.1.044 п. 4.3, были отобраны три навески добавки ОГ. Пожарно-технические испытания проводили при температуре 18,5 °С, атмосферном давлении 100,5 КПа и относительной влажности 56 %. Результаты представлены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Негорючесть добавки ОГ

Температура реакционной камеры до введения образца, °С	Максимальная температура газообразных продуктов горения, °С	Время достижения максимальной температуры, сек	Масса навески, г		Потеря массы навески, %
			до испытания	после испытания	
200	585	300	61,54	36,19	41,19
200	570	300	60,26	37,45	37,85
200	590	300	61,73	34,12	44,73

Добавка ОГ относится к группе нетоксичных горючих трудно-воспламеняемых материалов. Ее хранение на складе, при получения гидрофобного концентрата и ремонтного бетона, а также при работе на объекте не представляет пожарной опасности.

При санитарно-гигиенической экспертизе, проведены одориметрические исследования. Определено наличие, интенсивность и характер запаха воздуха. Запах и интенсивность определяли по 5–и бальной шкале Р. Райта с привлечением десяти здоровых лиц (дегустаторов). Каждый испытуемый вдыхал через нос воздух из трубки эксикатора, в который были помещены пластинки, покрытые слоем добавки ОГ. Полученные результаты сравнили с «контролем» – воздухом, который не имел контакта с исследуемой композицией и не обладал посторонними запахами (табл. 3.5).



Таблица 3.5

Одориметрические исследования добавки ОГ

Характеристика запаха	Количественная оценка, средний балл
отсутствует	1

В результате проведенного исследования установлено, что запах исследуемого образца добавки ОГ не превышает допустимых нормативов.

При токсикологическом исследовании изучено кожно-раздражающее действие добавки ОГ при однократном эксперименте. Результаты приведены в табл. 3.6.

Таблица 3.6

Кожно-раздражающее действие добавки ОГ  
при однократном эксперименте

Кожно-раздражающее действие, балл	
результат, балл	норма по ТНПА
$I_{cut} = 0,6$ балла, средство вызывает слабо выраженное раздражение кожных покровов (1 класс)	1 класс (0,1 до 2 баллов)

Санитарно-химические исследования на соответствие добавки ОГ требованиям СанПиН 2.1.2.12–25 проведены при следующих модельных условиях: время экспозиции 24 часа при температуре 40 °С, насыщенность 0,3 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>. Результаты приведены в табл. 3.7.

Таблица 3.7

Санитарно-химические исследования добавки ОГ

Модельная среда	Исследуемый параметр	Допустимый уровень	Результат	ТНПА на методы исследований
воздух	формальдегид	12,0 мкг/м <sup>3</sup>	8,2	М 02–02–95

Исследование острой пероральной токсичности. При внутрижелудочном введении 25 % водного раствора добавки ОГ в дозе 3500–5500 мг/кг нелинейным белым крысам, признаков интоксикации и изменения в поведении опытных животных не установлено. Гибели опытных животных в течение всего периода наблюдения не отмечалось. По параметру острой внутрижелудочной токсичности, добавка ОГ относится к веществам IV класса опасности,  $LD_{50} \geq 5000$  мг/кг (малоопасные вещества, по проекту ТНПА). Результаты радиологических исследований приведены в табл. 3.8.

Таблица 3.8  
Радиологические исследования добавки ОГ

Эффективная удельная активность естественных радионуклидов	Допустимый уровень А эфф.	Единицы измерения	ТНПА на методы исследований
<45,7	$\leq 370$	Бк/кг	НРБ–2000

Удельная эффективная активность естественных радионуклидов добавки ОГ, согласно ГОСТ 30459, не превышает уровня требований для ремонтных материалов, регламентируемых НРБ–2000.

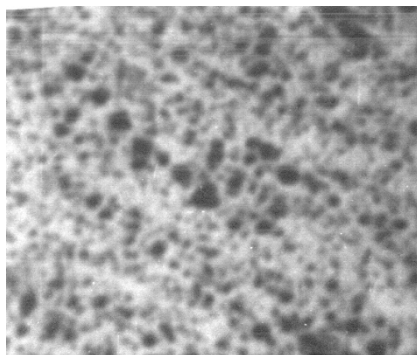
В результате исследований установлено, что добавка ОГ по параметру острой токсичности ( $LD_{50}$  per os) относится к малоопасным веществам – IV класса опасности по ГОСТ 12.1.007, обладает слабовыраженным кожно-раздражающим действием на неповрежденные кожные покровы лабораторных животных и соответствует требованиям ТНПА на продукцию.

По одориметрическим показателям добавка ОГ соответствует требованиям Инструкции 2.1.2.10–12–38. Миграция химических веществ (формальдегид) из исследованного образца в контактирующую среду (воздух) в принятых условиях эксперимента не превышает допустимого количества, регламентируемого требованиями СанПиН 2.12.25.

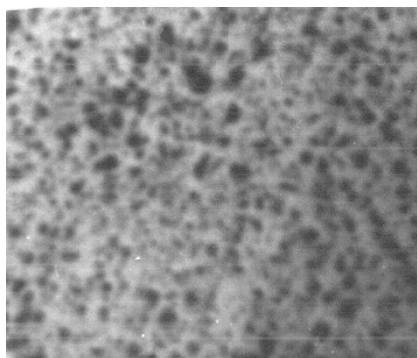
Результаты проведенных исследований показали, что добавка ОГ по параметрам безопасности соответствует требованиям, предъявляемым к материалам для ремонта бетонных и железобетонных конструкций автомобильных дорог.

### 3.4. Микроскопическое исследование добавки ОГ

Методом оптической микроскопии проведены исследования добавки ОГ (рис. 3.5 и 3.6). На них дисперсная фаза – частицы бентонита с сорбированными смолами и полициклическими соединениями, изображены темными образованиями, дисперсионная среда; углеводороды – более светлый фон.

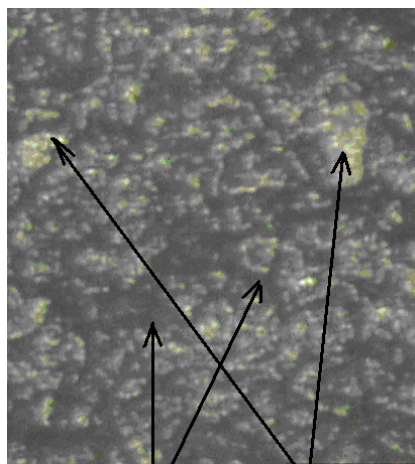


*a* – образец ОГ-1



*б* – образец ОГ-2

Рис. 3.5. Оптические микроснимки добавки ОГ (увеличение  $\times 200$ )



Дисперсная фаза  
(бентонит с сорбированными смолами и полициклическими соединениями)

Дисперсионная среда  
(углеводороды)

Рис. 3.6. Оптико-микроскопический снимок добавки ОГ

Высокомолекулярные органические соединения, прежде всего циклические и ароматические углеводороды, и смолы, извлеченные из масел в процессе очистки, равномерно распределены в бентоните. Высокая удельная поверхность (20000–30000 см<sup>2</sup>/г) позволяет сорбировать значительное количество углеводородов ароматического характера и смол, гидрофобизирующих бентонит. Размеры агрегатов близки между собой.

Несмотря на различные сроки и условия хранения, физико-химические свойства образцов добавки ОГ из вторичных продуктов, взятых «с установки контактной очистки масла» и «с мест хранения в Полоцком регионе», оказались схожими.

### 3.5. Определение свойств органической массы

Физико-химические характеристики образцов ОМ–1 и ОМ–2, выделенных из образцов добавки ОГ–1 и ОГ–2, представлены в табл. 3.9. Точность метода при разделении ОМ составила ±2 %.

Таблица 3.9  
Физико-химические характеристики образцов ОМ

Наименование показателей	Показатели	
	ОМ–1	ОМ–2
Плотность при 20 °С, г/см <sup>3</sup>	0,937	0,941
Показатель преломления n <sub>D</sub> <sup>20</sup>	1,57	1,58
Молекулярная масса	424	418
Вязкость при 100 °С, мм <sup>2</sup> /сек	6,5	5,2
Температура вспышки (в открытом тигле), °С	229	231
Теплота сгорания (низшая), Дж/г	41163	40643
Зольность, % по массе	0,007	0,009
Кислотное число, мг КОН/г	1,25	1,27
Атомное отношение Н/С	1,53	1,52

Следует обратить внимание на элементный состав органической массы и битума (таблица 3.10), показатели которого представлены на основании данных Г. И. Горчакова и Ю. М. Баженова [18].

Отечественные и зарубежные литературные источники, свидетельствуют о введении в бетонные смеси органических компонентов и бентонита. Это позволяет сделать вывод о возможности использования добавки ОГ для улучшения физико-технических характеристик ремонтных бетонов.

Таблица 3.10

Элементный состав ОМ и битума

Наименование показателей		Показатели		
		ОМ-1	ОМ-2	битум
Элементный состав, % по массе	углерод	86,36	86,23	70–80
	водород	10,98	10,92	10–15
	сера	0,69	0,76	2–9
	азот	1,14	1,18	0–2
	кислород	0,83	0,91	1–5

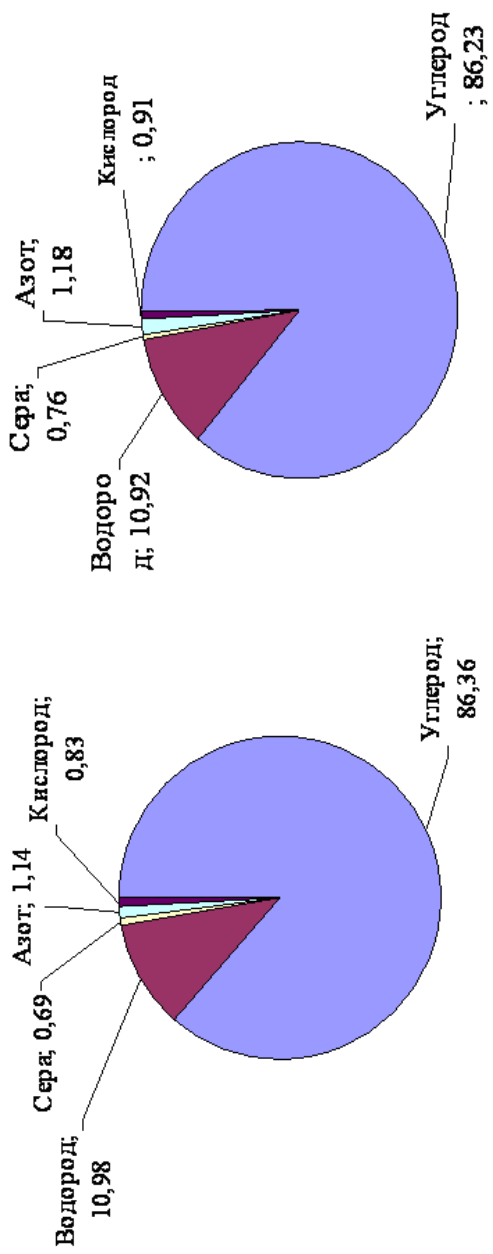
Представленные в табл. 3.10 данные, свидетельствуют о значительном содержании парафинонафтеновых углеводородов в ОМ. По элементному составу, (рис. 3.7), органическая масса состоит в основном из углерода и водорода.

Содержание серы в ОМ составляет менее 0,76 % или, учитывая максимальное количество добавки ОГ, равное 4,0 % от массы цемента (~ 2,0 % ОМ), менее 0,0152 % от массы цемента.

На рис. 3.7, видно, что свойства элементного состава органической массы за время хранения практически не изменились.

Эмпирические формулы органической массы и бентонита можно представить в следующем виде:

- ОМ-1 ( $C_{30,49}H_{46,19}S_{0,09}N_{0,08}O_{0,24}$ );
- ОМ-2 ( $C_{30,01}H_{45,28}S_{0,10}N_{0,35}O_{0,24}$ );
- бентонит ( $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot nH_2O$ ).



*a* – образец OM-1

*б* – образец OM-2

Рис. 3.7. Элементный состав по массе, %

На рис. 3.8 отмечены характерные колебания интенсивности полос поглощения метильных и метиленовых групп в областях 2960, 2930, 1465, 1380  $\text{см}^{-1}$ . О незначительном содержании алифатических структур и представлении их короткими алкильными цепями с числом атомов углерода менее четырех, свидетельствует отсутствие полосы 720  $\text{см}^{-1}$ .

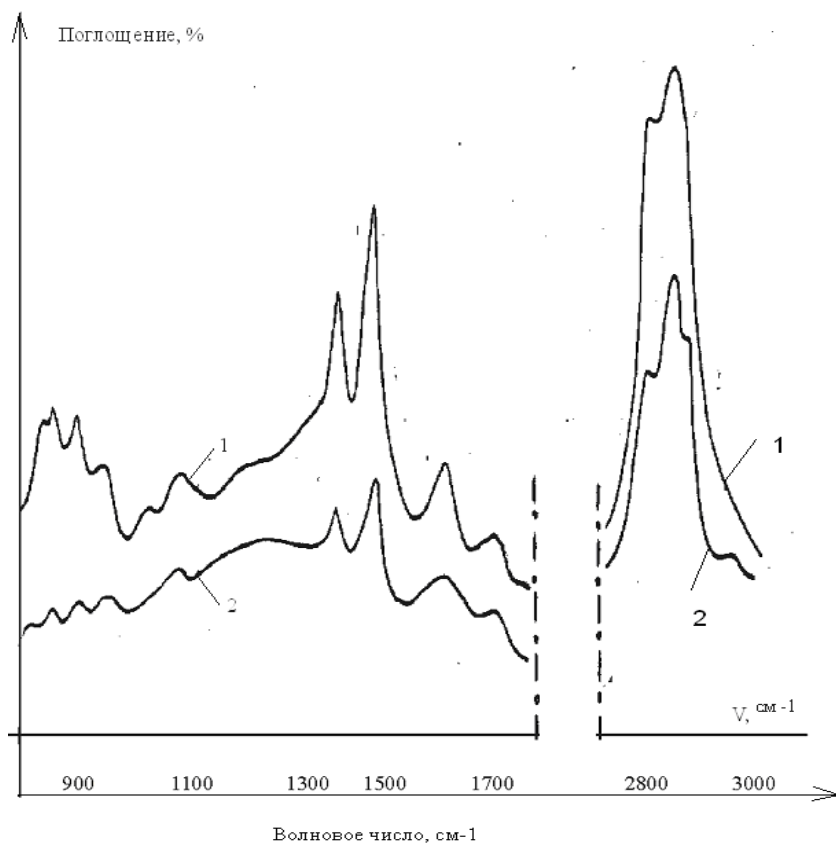


Рис. 3.8. ИК спектры ОМ:  
 1 – образец «с установки контактной очистки масла»;  
 2 – образец «с мест хранения в Полоцком регионе»

На рис. 3.9 представлены результаты дериватографического исследования остатка после выделения ОМ.

Групповой химический состав углеводов и смол ОМ представлен на рис. 3.10. Он содержит значительное количество метано-нафтеновых, моноциклоароматических, бициклоароматических и полициклоароматических углеводов. Это указывает на значительный гидрофобизирующий потенциал добавки ОГ.



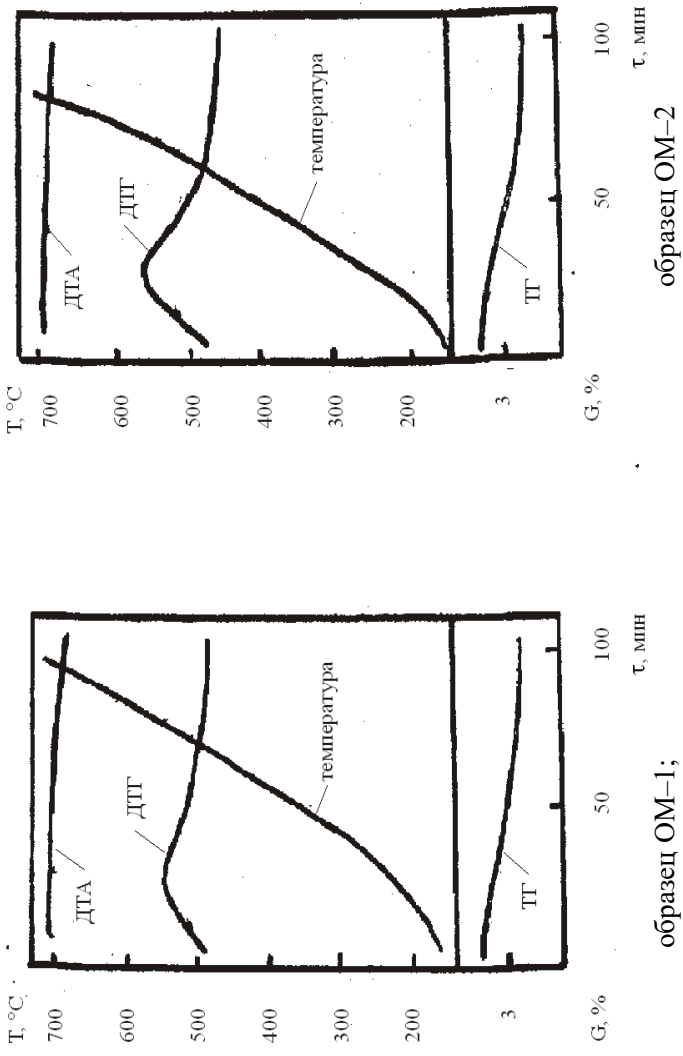
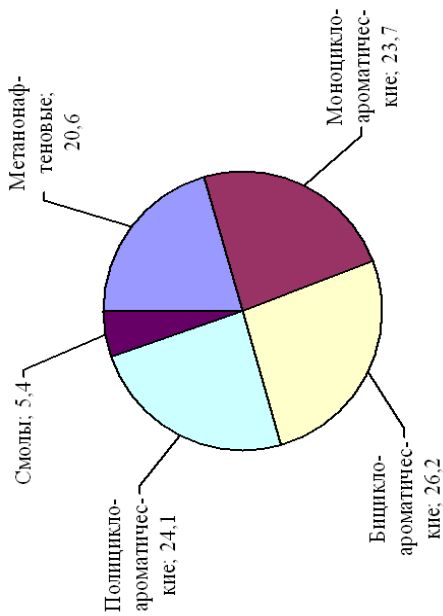
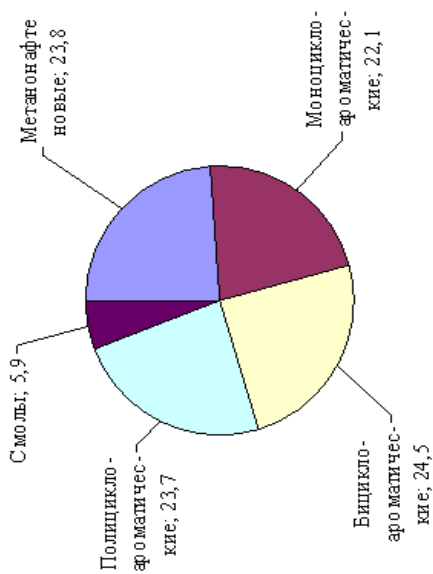


Рис. 3.9. Дерииваграфическое исследование остатка после выделения ОМ



*b* – образец ОМ–2



*a* – образец ОМ–1

Рис. 3.10. Групповой химический состав углеводородов и смол (в % по массе)

Карбоксильные, сложноэфирные и карбонильные группы определяли с использованием двух навесок ОМ (в каждой серии), а гидроксильных – по три. Результаты приведены в табл. 3.11.

Таблица 3.11  
Кислородосодержащие функциональные группы ОМ

Наименование		Показатели	
		ОМ–1	ОМ–2
Количество кислородосодержащих функциональных групп, мг КОН/г	карбоксильных – COOH	1,25	1,27
	сложноэфирных – RCOOH	2,14	2,31
	карбонильных – C=O	3,86	3,78
	гидроксильных – OH	5,07	6,12

Большое содержание гидроксильных групп в ОМ–1 и в ОМ–2, по-видимому, связано с условиями хранения и транспортировки добавки ОГ в присутствии кислорода воздуха и каталитического действия глины (см. табл. 3.11). А значительное содержание кислородосодержащих функциональных групп свидетельствует о возможности использования добавки ОГ для повышения прочности сцепления слоя ремонтного бетона с бетонной поверхностью мостов и путепроводов.

### Выводы по главе 3

1. В результате исследований вторичных продуктов производства минеральных масел установлено, что они состоят из гидрофобизированного бентонита (~ 55 %) и органической массы (~ 45 %). Бентонит, благодаря высокой удельной поверхности, сорбировал значительное количество высокомолекулярных органических соединений с относительно низким содержанием водорода, и прежде всего метанонафтеновых углеводов (20,6–23,8 %), цикло–

ароматических углеводородов (70,3–74,0 %) и смол (5,4–5,9 %), которые распределены практически равномерно и гидрофобизируют бентонит [43, 44].

Органическая масса, входящая в отработанную глину, по элементному составу состоит из углерода 86,23–86,36 %, водорода 10,92–10,98 %, серы 0,69–0,76 %, азота 1,14–1,18 % и кислорода 0,83–0,91 %. Максимальное количество серы по отношению к массе цемента составляет менее 0,0152 % [45].

2. Добавка ОГ, изготовленная из вторичных продуктов производства минеральных масел, отобранных «с установки контактной очистки масла» содержит меньше серы (0,34 %), чем взятых «с мест хранения в Полоцком регионе» (0,37 %); для нее характерна низкая влажность 0,96–1,43 % по массе, а истинная плотность составляет 1,89–1,85 г/см<sup>3</sup> и она предпочтительнее для приготовления добавки отработанной глины [43–45].

3. Экспериментально установлено, что добавка отработанной глины не набухает в воде и обладает гидрофобными свойствами, не изменяющимися с течением времени. Она относится к группе трудновоспламеняемых материалов. Удельная эффективная активность естественных радионуклидов составляет менее 45,7 Бк/кг и не превышает уровня требований для ремонтных материалов, регламентируемых НРБ–2000 ( $\leq 370$  Бк/кг). По параметру острой токсичности ( $LD_{50}$  per os) она относится к малоопасным веществам – IV класса опасности по ГОСТ 12.1.007, обладает слабовыраженным кожно-раздражающим действием на неповрежденные кожные покровы и соответствует требованиям ТНПА, предъявляемым к добавкам в бетон [43, 44].

4. Результаты этих исследований теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность получения из вторичных продуктов производства минеральных масел добавки ОГ в ремонтные бетонные смеси, так как гидрофобизированный бентонит будет кольматировать поры и капилляры ремонтных бетонов, а органическая составляющая добавки, за счет адсорбции на стенках пор и капилляров, придаст им гидрофобные свойства, что в целом обеспечит снижение проницаемости ремонтного бетона [43, 44].

## ГЛАВА 4

# ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ И РЕМОНТНОГО БЕТОНА, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ДОБАВКОЙ ОТРАБОТАННОЙ ГЛИНЫ

### 4.1. Моделирование и обработка результатов исследований

Получение новой добавки сопровождается проведением большого объема подготовительной работы. Добавка, влияя на основные параметры: прочность, морозостойкость, водонепроницаемость, водопоглощение и др., может изменить и другие физико-технические характеристики цементного камня и бетона. Поэтому, исследования требуют значительных интеллектуальных и материальных затрат. Важнейшим этапом научного исследования является определение минимально достаточного объема экспериментальных работ.

В соответствии с ГОСТ 30459 одним из требований к характеристикам ремонтных бетонов является водопоглощение.

Для получения зависимости значения водопоглощения (выходная переменная) от количества добавки ОГ, водоцементного отношения и количества цемента (факторы), при наличии аддитивной помехи случайного характера, проведен регрессивный анализ и по экспериментальным данным получены регрессивные модели.

Исходным материалом для получения точечных оценок параметров регрессионной модели, является набор из  $n$  наблюдений над значениями факторов  $x_1$  – количество добавки ОГ, %,  $x_2$  – количество цемента, кг,  $x_3$  – водоцементное отношение В/Ц и отклика  $y$  – водопоглощение по массе  $W_m$ , %.

Уравнение для описания свойств бетона представлено следующей формулой с коэффициентами уравнений, зависящими от числа влияющих факторов:

$$y_i = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3, \quad (4.1)$$

В работе экспериментальные исследования и обработка полученных результатов выполнены с использованием методик, изло-

женных в источниках [46–48]. Значения факторов варьировались на трех уровнях, которые в дальнейшем обозначали символами: верхний +1, средний 0, нижний –1. На основании анализа литературных источников, выбраны интервалы варьирования факторов, влияющих на водопоглощение (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Интервалы варьирования факторов

Обозначения в переменных		Уровни факторов			Интервалы варьирования факторов
кодированных	натуральных	нижний –1	основной 0	верхний 1	
$x_1$	Добавка ОГ, %	0,0	2,0	4,0	2,0
$x_2$	Ц, кг	340	410	480	70
$x_3$	В/Ц	0,40	0,45	0,50	0,05

В табл. 4.2 представлен план второго порядка трехфакторный в кодированных значениях при числе влияющих факторов равном трем.

Таблица 4.2

## План второго порядка трехфакторный

№ пп.	План			Квадраты			Взаимодействия			Отклик
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_{11}$	$x_{22}$	$x_{33}$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$y_w, \%$
1.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4,0
2.	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	5,3
3.	1	-1	1	1	1	1	-1	1	-1	4,2
4.	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	5,7
5.	1	1	-1	1	1	1	1	-1	-1	3,3
6.	-1	1	-1	1	1	1	-1	1	-1	4,2
7.	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	3,6
8.	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	4,5
9.	1	0	0	1	0	0	0	0	0	3,7
10.	-1	0	0	1	0	0	0	0	0	4,8
11.	0	1	0	0	1	0	0	0	0	3,9
12.	0	-1	0	0	1	0	0	0	0	4,4
13.	0	0	1	0	0	1	0	0	0	4,7
14.	0	0	-1	0	0	1	0	0	0	3,8
15.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,3
16.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,0
17.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,9

Применение трехфакторного плана второго порядка обусловлено нелинейными свойствами объектов исследований. Каждый фактор изменяется на трех уровнях.

Составляем матрицу планирования и после проведения испытаний на водопоглощение результаты сводим в табл. 4.3.

Таблица 4.3

## План проведения эксперимента и результаты

№ п.п.	План в кодах			План в значениях			Параметры
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	добавка ОГ, %	Ц, кг	В/Ц	водопоглощение, %
1.	1	1	1	4,0	480	0,50	4,0
2.	-1	1	1	0,0	480	0,50	5,3
3.	1	-1	1	4,0	340	0,50	4,2
4.	-1	-1	1	0,0	340	0,50	5,7
5.	1	1	-1	4,0	480	0,40	3,3
6.	-1	1	-1	0,0	480	0,40	4,2
7.	1	-1	-1	4,0	340	0,40	3,6
8.	-1	-1	-1	0,0	340	0,40	4,5
9.	1	0	0	4,0	410	0,45	3,7
10.	-1	0	0	0,0	410	0,45	4,8
11.	0	1	0	2,0	480	0,45	3,9
12.	0	-1	0	2,0	340	0,45	4,4
13.	0	0	1	2,0	410	0,50	4,7
14.	0	0	-1	2,0	410	0,40	3,8
15.	0	0	0	2,0	410	0,45	4,3
16.	0	0	0	2,0	410	0,45	4,0
17.	0	0	0	2,0	410	0,45	3,9

Рассчитаем коэффициенты уравнения в кодированных значениях. Для каждого фактора умножаем кодированные значения на водопоглощение (табл. 4.4).



Таблица 4.4

План второго порядка трехфакторный в измеренных единицах

№ п.п.	План			Квадраты			Взаимодействия			Отклик $y_u$
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_{11}$	$x_{22}$	$x_{33}$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$y, \%$
1.	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
2.	-5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3	-5,3	-5,3	5,3	5,3
3.	4,2	-4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	-4,2	4,2	-4,2	4,2
4.	-5,7	-5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	-5,7	-5,7	5,7
5.	3,3	3,3	-3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	-3,3	-3,3	3,3
6.	-4,2	4,2	-4,2	4,2	4,2	4,2	-4,2	4,2	-4,2	4,2
7.	3,6	-3,6	-3,6	3,6	3,6	3,6	-3,6	-3,6	3,6	3,6
8.	-4,5	-4,5	-4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
9.	3,7	0	0	3,7	0	0	0	0	0	3,7
10.	-4,8	0	0	4,8	0	0	0	0	0	4,8
11.	0	3,9	0	0	3,9	0	0	0	0	3,9
12.	0	-4,4	0	0	4,4	0	0	0	0	4,4
13.	0	0	4,7	0	0	4,7	0	0	0	4,7
14.	0	0	-3,8	0	0	3,8	0	0	0	3,8
15.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,3
16.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,0
17.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,9
Сумма	-5,7	-1,7	4,5	43,3	43,1	43,3	0,2	-1	0	72,3

Сумма квадратов переменных  $(43,3+43,1+43,3) = 129,7$ .

Получаем суммы для каждого фактора по столбцам, представляющие собой  $[iy]$ ,  $[jy]$ ,  $[jy]$ :

$$[Q_y]=72,3, \quad (4.2)$$

$$\sum_i^k [ijy] = 129,7. \quad (4.3)$$

Для значений водопоглощения рассчитаем коэффициенты уравнения, а результаты сведем в табл. 4.5.

Таблица 4.5

Статистические характеристики опытов в нулевой точке

Среднее арифметическое	$(4,3+4,0+3,9)/3=4,067$
Дисперсия	$S_0^2 = \frac{(4,3 - 4,1)^2 + (4,0 - 4,1)^2 + (3,9 - 4,1)^2}{3 - 1} = 0,045$
Среднее квадратичное отклонение	$S_0 = \sqrt{0,045} = 0,212$
Средняя квадратичная ошибка в определении коэффициентов (для трехфакторного эксперимента значение под корнем = 8)	$S\{b_i\} = \frac{0,212}{\sqrt{8}} = 0,075$
Табличное значение критерия Стьюдента	2,12

Проводим анализ значимости коэффициентов уравнения 4.1, для трехфакторного плана второго порядка, рассчитываем их по следующим формулам:

$$b_0 = 0,1831[Q_y] - 0,0704 \sum_1^k [ijy], \quad (4.4)$$

$$b_i = 0,1[iy], \quad (4.5)$$

$$b_{ii} = -0,0704 [Q_y] + 0,5[ijy] - 0,1268 \sum_1^k [ijy], \quad (4.6)$$

$$b_{ij} = 0,125 [iijy]. \quad (4.7)$$

Таблица 4.6

Анализ коэффициентов уравнения

Параметры	Коэффициенты уравнения									
	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_{11}$	$b_{22}$	$b_{33}$	$b_{12}$	$b_{13}$	$b_{23}$	$b_0$
Значения до анализа	-0,57	-0,17	0,45	0,11	0,01	0,11	0,03	-0,13	0,00	4,11
Ошибка в определении коэффициентов уравнения	0,07	0,07	0,07	0,13	0,13	0,13	0,07	0,07	0,07	0,09
Расчетное значение критерия Стьюдента	8,66	2,58	6,84	0,90	0,11	0,90	0,34	1,70	0,00	46,11
Табличное значение критерия Стьюдента	2,12	2,12	2,12	2,12	2,12	2,12	2,12	2,12	2,12	2,12
Значимость коэффициентов	-0,57	-0,17	0,45	0,11	0,11	0,11	0,00	0,00	0,00	4,11

В уравнение для описания свойств бетона, представленное формулой 4.1 с коэффициентами уравнений, зависящими от числа влияющих факторов, подставим значения коэффициентов уравнений (табл. 4.6). Не принимая во внимание малозначимые факторы,

определенные с использованием критерия Стьюдента, получим окончательное уравнение 4.8 для описания модели:

$$y_i = 4,11 - 0,57x_1 - 0,17x_2 + 0,45x_3 + 0,11x_1^2 + 0,11x_3^2 - 0,13x_1x_3. \quad (4.8)$$

Пригодность полученного уравнения оцениваем по формуле:

$$f_{\hat{a}\hat{a}} = N_1 - m - (n_0 - 1). \quad (4.9)$$

Таблица 4.7

Проверка пригодности уравнения

№ опыта	Полученные результаты		$y_u - y_p$	$(y_u - y_p)^2$
	опытные $y_u$	рассчитанные $y_p$		
1.	4,0	4,06	-0,06	0,0036
2.	5,3	5,20	0,10	0,01
3.	4,2	4,40	-0,20	0,04
4.	5,7	5,54	0,16	0,026
5.	3,3	3,16	0,14	0,0197
6.	4,2	4,30	-0,10	0,01
7.	3,6	3,50	0,10	0,01
8.	4,5	4,64	-0,14	0,0195
9.	3,7	3,65	0,05	0,0024
10.	4,8	4,79	0,01	0,001
11.	3,9	3,95	-0,05	0,0026
12.	4,4	4,29	0,11	0,012
13.	4,7	4,67	0,03	0,001
14.	3,8	3,77	0,03	0,0008
15.	4,3	4,11	0,19	0,037
16.	4,0	4,11	-0,11	0,012
17.	3,9	4,11	-0,21	0,043

Сумма 0,2506

Таблица 4.8

## Пригодность полученного уравнения

Число значимых коэффициентов	7
Число степеней свободы в нулевой точке	2
Число степеней свободы для уравнения	8
Дисперсия в нулевой точке	0,043
Дисперсия адекватности	0,031
Расчетное значение критерия Фишера	1,395
Табличное значение критерия Фишера	19,37

Полученное уточненное уравнение пригодно для использования, поскольку расчетное значение критерия Фишера – 1,395 меньше табличного – 19,37 (табл. 4.8).

Для графической интерпретации результатов на кубе, один из факторов фиксируем. Затем по уравнению 4.10 строим график зависимости водопоглощения ремонтного бетона от количества добавки ОГ и водоцементного отношения (рис. 4.1). Для этого, в соответствии с табл. 4.1, количество цемента принимаем равным 410 кг и в кодированных переменных  $x_2 = 0$ . Данное значение подставляем в уравнение 4.8 и получаем:

$$y_i = 4,11 - 0,57x_1 + 0,45x_3 + 0,11x_1^2 + 0,11x_3^2 - 0,13x_1x_3 . \quad (4.10)$$

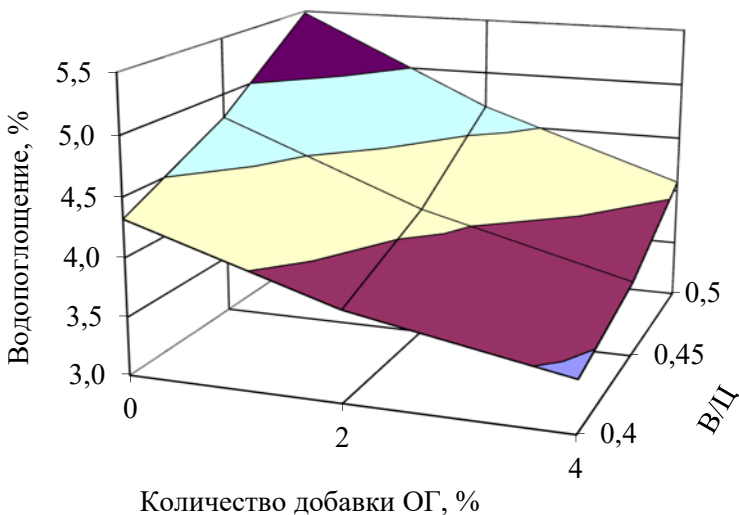


Рис. 4.1. Влияние добавки ОГ и водоцементного отношения на водопоглощение ремонтного бетона ( $\rho = 410 \text{ кг}$ )

При увеличении количества добавки ОГ и уменьшении водоцементного отношения снижается водопоглощение (рис. 4.1). Это связано с уменьшением сечения пор и гидрофобизацией их поверхности. В количественном выражении значение водопоглощения находится в пределах 3,4–5,5 % (по массе).

Аналогично строим график влияния добавки ОГ и расхода цемента на водопоглощение (рис. 4.2). В соответствии с табл. 4.1, значение  $В/Ц=0,45$ , что в кодированных переменных соответствует  $x_3=0$  и, подставляя его в уравнение 4.8, получаем:

$$y = 4,11 - 0,57x_1 - 0,17x_2 + 0,11x_1^2 \quad (4.11)$$

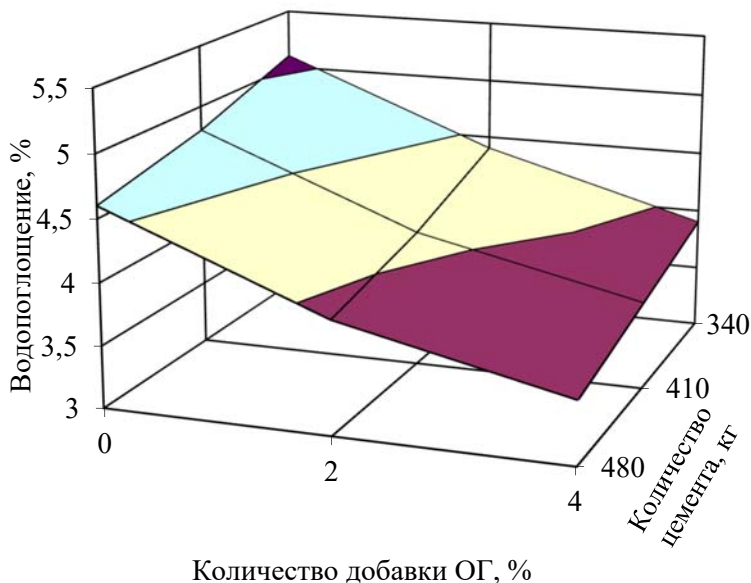


Рис. 4.2. Влияние добавки ОГ и цемента на водопоглощение ремонтного бетона (В/Ц=0,45)

При изменении количества добавки ОГ и цемента, водопоглощение бетона изменяется в пределах 3,4–4,8 % по массе (рис. 4.2), что составляет более 29 %.

На основании представленных данных можно сделать вывод, что увеличение количества добавки ОГ и цемента с одновременным снижением водоцементного отношения, улучшает физико-технические характеристики ремонтных бетонов.

#### 4.2. Способы введения добавки ОГ в цемент и получение порошкообразного гидрофобного концентрата

Добавку ОГ вводили в бетонную смесь двумя способами. По первому загружали в смесительную установку без предварительной подготовки (в комковатом виде) при подаче цемента. По второму

предварительно смешивали с цементом или песком перед приготовлением бетонной смеси. Способ введения добавки ОГ в цемент описан в патенте ВУ 11645 [49].

Способ введения добавки ОГ в предварительно просеянный сухой песок аналогичен способу ее введения в цемент и описан ниже. Однако, введение добавки в песок оказалось экономически неоправданным. В частности, для исключения воздействия на предварительно просеянный сухой песок внешних атмосферных воздействий и загрязнения гидрофобизированного песка, их необходимо хранить в закрытом складе, что приведет к дополнительным затратам.

При введении добавки ОГ в воду затворения и вращения смешивающей лопасти со скоростью 500–1000 об/мин, не смешавшихся агрегатов не наблюдалось, однако, после прекращения процесса смешивания, неорганический компонент частично оседал на дно емкости и перед введением воды затворения в бетонную смесь процесс перемешивания приходилось повторять. В связи этим в экспериментальной части исследований данный способ не использовали.

В качестве основного выбран способ введения добавки ОГ в цемент [49].

При приготовлении ремонтного бетона в лабораторных условиях (для изготовления опытных образцов: кубики, призмы, цилиндры и др.), гидрофобный цемент в небольших количествах получали с использованием мешалки, имеющей скорость вращения в пределах от 500 до 1000 об/мин. После перемешивания полученную смесь просеивали, отделяли комки, которые повторно домешивали и добавляли в смесь цемента и добавки.

Однако при увеличении количества смешиваемых компонентов (песка и добавки), например, при изготовлении подкладных плит объемом  $\sim 0,6 \text{ м}^3$ , потребовалось смешать 5,0 кг добавки ОГ и 250 кг цемента. При этом отдельные комки добавки ОГ, покрытые слоем цемента, не перемешивались. Для их перемешивания полученную смесь просеивали через сито, а оставшиеся на сите комки домешивали отдельно. Учитывая количество цемента, вводимого в состав бетонной смеси, это потребовало значительных затрат времени.

Учитывая приведенные выше технологические сложности по введению добавки ОГ, был разработан новый способ ее смешивания с цементом. Способ заключался в получении порошкообразного гидрофобного концентрата (далее – ПГК), который затем вводили в



состав бетонной смеси. При разработке способа принято во внимание то, что для приготовления бетонной смеси количество добавки ОГ изменяется в пределах 0,2–4,0 %, следовательно, единственным путем снижения объема и массы перемешиваемых компонентов, является уменьшение количества цемента. Основные требования, предъявляемые к процессу получения ПГК можно представить в следующем виде:

1. Получение однородной смеси добавки ОГ и цемента;

2. Определение оптимального соотношения количества добавки ОГ и цемента, уменьшение времени перемешивания.

В связи с этим был разработан, экспериментально опробован и запатентован новый двухступенчатый способ приготовления ремонтной бетонной смеси.

Суть предложенного способа заключается в следующем. Цемент, перед введением в бетонную смесь, делят на две части (по массе). Масса первой части равняется количеству вводимой в смесь добавки ОГ и изменяется в пределах 0,2–4,0 % от общей массы цемента. Вторая часть составляет 96,0–99,8 % от общей массы цемента.

На первой ступени, проводимой в строительной лаборатории или на заводе по производству строительных материалов, получают порошкообразный гидрофобный концентрат (ПГК). Для этого цемент смешивают с добавкой отработанной глины в соотношении 1/1, используя интенсивное принудительное перемешивание в мешалке, имеющей скорость вращения около 1000 об/мин, до достижения однородности.

На второй ступени (на строительной площадке) ПГК и оставшийся цемент (98 % от начальной массы) вводят в состав ремонтного бетона [50].

На рис. 4.3, *а* схематично представлен процесс получения ПГК, а рис. 4.3, *б* – подготовленные для смешивания цемент и добавка ОГ и полученный в результате их смешивания порошкообразный гидрофобный концентрат.



Рис. 4.3. Получение ПКГ:

*a* – схема получения ПКГ

*б* – компоненты смеси:  
 1 – цемент, 2 – добавка ОГ, 3 – ПКГ

Опытным путем определена оптимальная продолжительность времени смешивания цемента и добавки ОГ составляющая  $2 \pm 1$  мин. При смешивании менее этого времени смесь не достигает однородности, а свыше – дисперсность ПКГ практически не изменяется [50].

ПКГ также получали, смешивая цемент и добавку ОГ на бегунах, с одновременным перетиранием.

Введение органоминеральной добавки ОГ в составе ПКГ обеспечивает ее равномерное распределение в бетонной смеси и качество ремонтного бетона. Способ упрощает процесс совмещения комковой добавки ОГ и цемента.

Например, для введения 8,2 кг (2,0 %) добавки ОГ в 410 кг цемента дозировали 8,2 кг цемента, а суммарная масса ПКГ составила 16,4 кг. Дальнейшее совмещение порошкообразного гидрофобного концентрата с остальными компонентами ремонтного бетона проводят на строительной площадке.

При введении добавки ОГ в количестве 2,0 % (8,2 кг) сразу в весь дозированный цемент 410 кг, суммарная масса перемешиваемых компонентов (на первом этапе) составляет 418,2 кг, что более чем в 22 раза превышает массу ПКГ. Одновременно значительно увеличивается время введения добавки ОГ, а для достижения однородности всю смесь просеивают и отдельно перетирают и перемешивают комки с цементом.

Порошкообразный гидрофобный концентрат представлен на рис. 4.4, *а*. Углубленные исследования микрофрагментов ПГК, проведенные с использованием комплекта телевизионного микроскопа «Телемик-1», представлены на рис. 4.4, *б*.

Порошкообразный гидрофобный концентрат наносили на чистое обезжиренное стекло и прижимали вторым стеклом. Поверхность, полученную путем сдвига одного стекла относительно другого, изучали с использованием оптического микроскопа (исследование микроструктуры). ПГК – сыпучий порошок темно-серого цвета, в котором добавка ОГ перемешалась с цементом равномерно, без каких-либо комков. (см. рис. 4.4, *б*).

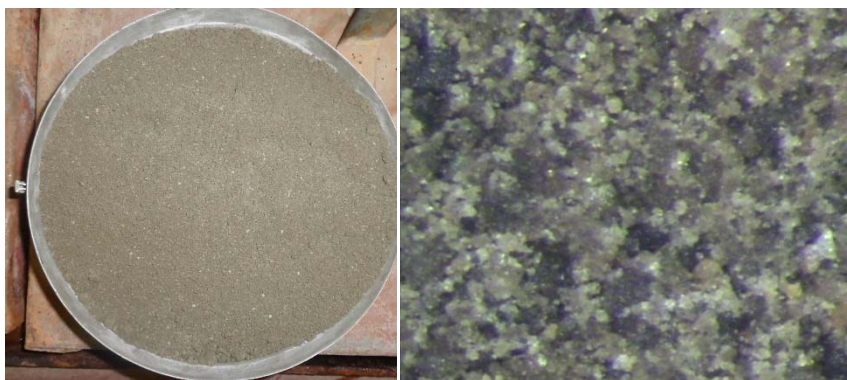


Рис. 4.4. Порошкообразный гидрофобный концентрат:  
*а* – ПГК                      *б* – микроструктура (увеличение  $\times 150$ )

ПГК хранили в полиэтиленовых мешках и в пластиковых ведрах, срок его хранения без потери сыпучести достигал более 3-х лет. Благодаря высокой полярности добавки ОГ, ПГК собирался в гидрофобные шарики диаметром 2–3 мм, которые рассыпались от легкого механического воздействия, а вода с их поверхности скатывалась каплями.

### 4.3. Технология введения органоминеральной добавки отработанной глины нефтеперерабатывающих заводов в ремонтные бетоны

Для введения добавки ОГ (в составе ПГК) в ремонтные бетонные смеси разработана упрощенная технологическая схема, которая представлена на рис. 4.5.

В соответствии с этой схемой, порошкообразный гидрофобный концентрат вводится в смесь при приготовлении на строительной площадке. Работы производятся в соответствии с разработанной технологической картой [51].

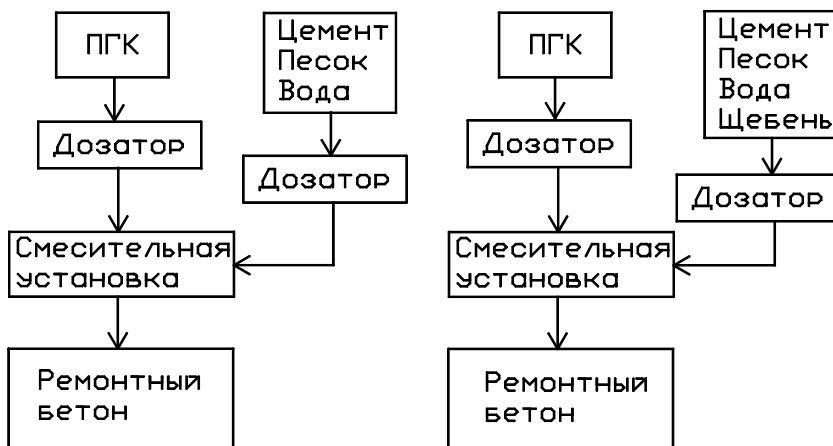


Рис. 4.5. Схема введения ПГК в состав ремонтного бетона

### 4.4. Исследование физико-технических свойств гидрофобного цемента

Гидрофобность цемента с добавкой ОГ определяли по водопоглощению. На его поверхность наносили каплю воды и измеряли время впитывания (рис. 4.6).

Клинкерные минералы  $3\text{CaO SiO}_2$  (алит),  $2\text{CaO SiO}_2$  (белит),  $3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$  (алюминат),  $4\text{CaO Al}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$  (браунмиллерит), при

контакте с высокомолекулярными: кислородо-, азото- и серосодержащими соединениями, адсорбируют их. В результате на цементных зернах, образуется гидрофобная пленка, которая повышает их устойчивость к прямому воздействию воды (см. рис. 4.6).

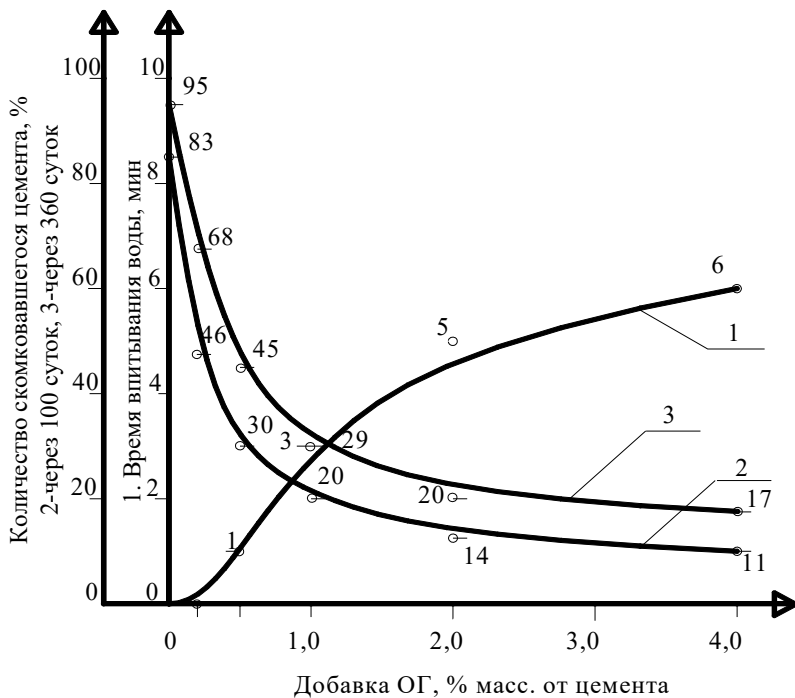


Рис. 4.6. Влияние добавки ОГ на свойства цемента: 1 – время впитывания воды, мин; 2, 3 – количество скомковавшегося цемента через 100 сут. и 360 сут.

Цемент без добавки и с добавкой ОГ (в количестве 4,0 % от массы цемента) фасовали в полиэтиленовые мешки и хранили в закрытом помещении при температуре воздуха ~ 20 °С и относительной влажности ~ 70 %. Через 100 дней хранения цемент просеяли. На сите осталось 83 % цемента без добавки и 11 % цемента с добавкой ОГ. Следовательно, добавка ОГ снижает комкование цемента до 7,5 раз. Исследования, проведенные через 360 дней хранения, пока-

зали, что скомковалось 17 % гидрофобизированного цемента, в то время как количество скомковавшегося цемента без добавки составило 95 %, что в 5,6 раза больше [74].

Гидрофобная пленка, адсорбированная на цементных зернах, повышает продолжительность времени впитывания воды в цемент. При нанесении на цемент без добавки капли воды, она сразу впитывается. При введении в цемент 1,0 % добавки ОГ время впитывания составляет 3 мин., а при введении 4,0 % – увеличивается до 6 мин, что свидетельствует о повышении гидрофобности цемента.

#### **4.5. Влияние добавки отработанной глины нефтеперерабатывающих заводов на физико-технические свойства цементного теста**

При затворении водой негидрофобизированные цементные зерна частично агрегируются и остаются в образовавшихся флоккулах, запирая воду и не вступая в реакцию гидратации. В таком состоянии они переходят в цементный камень, ухудшая его физико-технические характеристики.

При затворении цемента, гидрофобизированного органоминеральной добавкой отработанной глины, оболочки воды создают стерическое препятствие, растущее за счет адсорбции молекул органической массы и замедляющее гидратацию цемента. Гидрофильные группы хемосорбционно связываются с гидратирующей поверхностью цемента, а гидрофобные углеводородные радикалы, обращенные к воде, вследствие взаимного отталкивания, влияют на формирование структуры цементного камня. Органическая масса, адсорбируясь на поверхности цементных зерен, тормозит процессы гидратации в начальный период. При введении добавки ОГ происходит самопроизвольный распад агрегатов, образованных скоплением слипшихся коллоидных частиц, на агрегаты меньших размеров. Вода через микротрещины в гидрофобных пленках вступает в контакт с цементными зернами, вызывая набухание и дальнейшее раскрытие микротрещин. Нераскрывшаяся пленка снижает агрегацию цементных зерен и улучшает процесс их смачивания водой. Добавка ОГ обеспечивает дополнительную адсорбцию молекул воды на поверхности цементных зерен и снижает долю свободной во-

ды. Происходит равномерное и полное смачивание поверхности цементных зерен.

На рис. 4.7 представлены оптические микроснимки цементного теста. Образец с добавкой ОГ имеет более равномерный светлый фон.

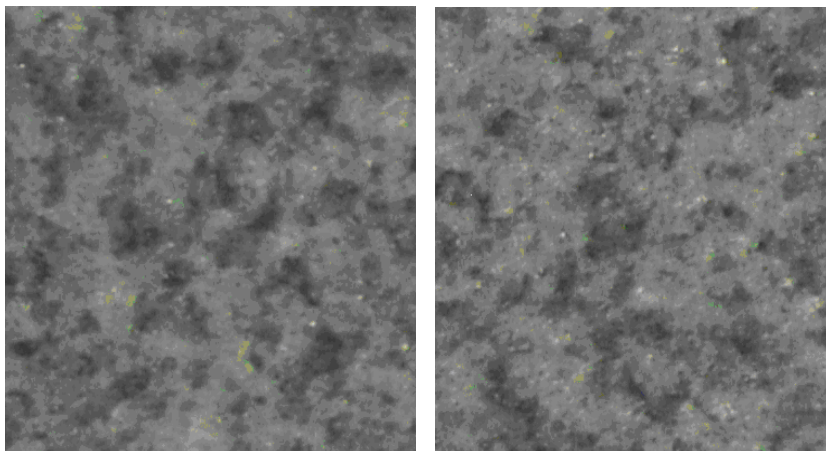


Рис. 4.7. Микроструктура цементного теста (увеличение  $\times 150$ ):

*a* – образец без добавки

*б* – образец с добавкой ОГ (4,0 %)

На основании анализа экспериментальных данных, приведенных в табл. 4.9, установлены эмпирические зависимости времени схватывания цементного теста от количества добавки ОГ (формулы 4.12–4.14).

Начало схватывания цементного теста:

$$T_{\text{нсд}} = T_{\text{нс}} + T_{\text{д}}. \quad (4.12)$$

Конец схватывания цементного теста:

$$T_{\text{кд}} = T_{\text{кс}} + 3 \times T_{\text{д}}. \quad (4.13)$$

Продолжительность схватывания цементного теста:

$$T_{\text{псд}} = T_{\text{пс}} + 2 \times T_{\text{д}}, \quad (4.14)$$

где  $T_{\text{псд}}$  – начало схватывания цементного теста с добавкой ОГ, мин;  
 $T_{\text{пс}}$  – начало схватывания цементного теста без добавки, мин;  
 $T_{\text{кзд}}$  – конец схватывания цементного теста с добавкой ОГ, мин;  
 $T_{\text{кс}}$  – конец схватывания цементного теста без добавки, мин;  
 $T_{\text{псд}}$  – продолжительность схватывания цементного теста с добавкой ОГ, мин;  
 $T_{\text{пс}}$  – продолжительность схватывания цементного теста без добавки, мин;  
 $T_{\text{д}}$  – изменение времени схватывания цементного теста, мин;  
 $д$  – количество добавки ОГ, %.

В численном выражении изменение времени  $T_{\text{д}}$  на 1 минуту соответствует изменению количества добавки ОГ ( $д$ ) на  $\approx 1,0$  %.

Таблица 4.9

Влияние добавки ОГ на цементное тесто

Количество добавки ОГ, %	Нормальная густота цементного теста	Время схватывания цементного теста, мин					
		экспериментальное			расчетное		
		начало	конец	продолжительность	начало	конец	продолжительность
0,0	25,5	150	210	60	150	210	60
0,2	25,5	150	210	60	150	211	61
0,5	25,5	150	210	60	151	212	61
1,0	25,5	150	215	65	151	213	62
1,5	25,5	150	215	65	152	215	63
2,0	25,5	155	220	65	152	216	64
4,0	25,4	155	225	70	154	222	68

В табл. 4.9 расчетные значения получены по формулам 4.12–4.14.

В формулах прослеживается близкая к линейной зависимость изменения времени начала, конца и продолжительности схватывания цементного теста от количества вводимой добавки ОГ.



Из табл. 4.9 видно, что экспериментальные и расчетные значения, полученные по формулам 4.12–4.14 отличаются менее чем на два процента. Адсорбированная на цементных зернах гидрофобная пленка, увеличивает продолжительность схватывания до 17 %. Незначительное изменение времени продолжительности схватывания цементного теста с добавкой ОГ, по сравнению с цементным тестом без добавки, связано с замедлением набора прочности на начальном этапе, и интенсивным раскрытием цементных зерен на последующих этапах.

#### **4.6. Влияние органоминеральной добавки отработанной глины на физико-технические свойства цементного камня**

При введении органоминеральной добавки ОГ в цемент, в соответствии с требованиями ТУ СТБ 1464, экспериментальным путем определили ее влияние на прочность цементного камня.

Первоначально в коллоидных системах образуются структуры смешанного типа с преобладанием коагуляционных контактов, которые характеризуются небольшой прочностью. Между частицами дисперсной фазы сохраняются тонкие прослойки жидкой дисперсионной среды, обеспечивающие пластичность и эластичность.

Коагуляционные структуры образованы за счет сравнительно слабых ван-дер-ваальсовых или водородных связей. При механическом воздействии они легко разрушаются, но благодаря тиксотропии, способны самопроизвольно восстанавливаться после прекращения на них воздействия. Коагуляционные структуры, пластичны, иногда эластичны, обладают свойством ползучести, способны к медленному развитию значительных остаточных деформаций.

По мере высушивания увеличивается концентрация системы, с уменьшением толщины прослойки растет механическая прочность структуры, повышается хрупкость и происходит переход к кристаллизационным контактам. Кристаллизационные структуры возникают в результате образования прочных химических связей между частицами и вследствие срачивания кристаллов, возникающих в процессе выкристаллизации новой фазы. Они не тиксотропны и непластичны. При образовании кристаллизационных структур точечные, а затем и фазовые контакты возникают при удалении диспер-

сионной среды или ее связывании при образовании гидратов. При этом улучшаются физико-технические характеристики цементного камня, уменьшается сечение пор и капилляров.

Методом электронной микроскопии изучена микроструктура образцов цементного камня без добавки и с добавкой ОГ (рис. 4.8–4.10).

Структура цементного камня без добавки имеет крупные поры и капилляры сечением 10–15 мкм, которые визуальны видны на микротографиях в виде темных овальных пятен (см. рис. 4.8, *a*). Согласно данным В. Г. Батракова, поверхностно-активные вещества концентрируются на межфазных поверхностях раздела, изменяют электрокинетический потенциал зерен цемента, препятствуют их агрегации и коагуляции [15]. В образцах с добавкой ОГ структура цементного камня равномерная с мелкими порами, размеры которых не превышают 5 мкм (см. рис. 4.8, *b*–4.10, *b*). Высокодисперсные частицы гидрофобного бентонита размером 1–2 мкм занимают свободное место вокруг более крупных зерен цемента (размером 20–30 мкм). В образцах с добавкой ОГ от кристаллов прослеживается образование отростков (рис. 4.10, *b*).

Поры оказывают существенное влияние на неравномерность распределения напряжений и деформаций в бетонном образце, являются концентраторами напряжений и существенно изменяют их в количественном и качественном измерениях. Оптимизация структуры цементного камня на уровне тоберморитового геля, за счет использования наполнителей снижает объем крупных пор.

Органическая масса гидрофобизирует цементный камень, а высокодисперсные частицы гидрофобного бентонита, заполняя поры и капилляры, уплотняют структуру. В соответствии с теорией В. В. Бабкова, частицы бентонита размещаются между зернами цемента, формируя цементный камень с меньшим количеством пор и более диспергированной капиллярной пористостью [9].

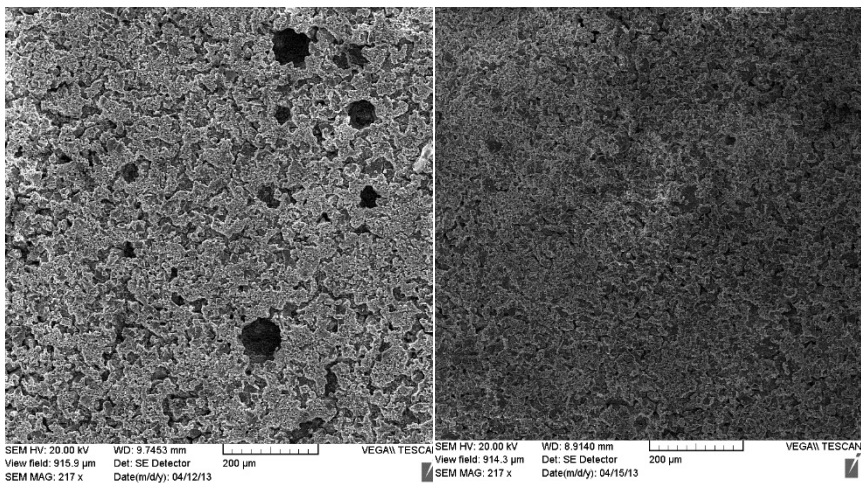


Рис. 4.8. Микроструктура цементного камня (увеличение  $\times 217$ ):  
*а* – образец без добавки      *б* – образец с добавкой ОГ (4,0 %)

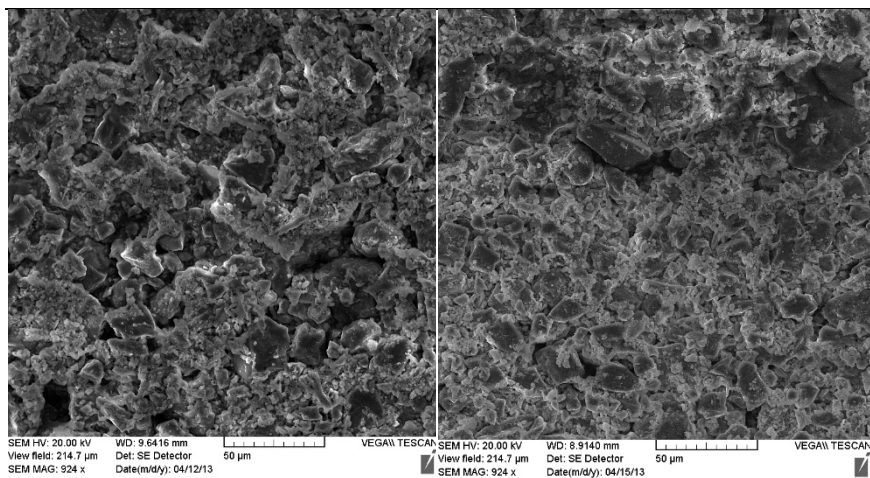


Рис. 4.9. Микроструктура цементного камня (увеличение  $\times 924$ ):  
*а* – образец без добавки      *б* – образец с добавкой ОГ (4,0 %)

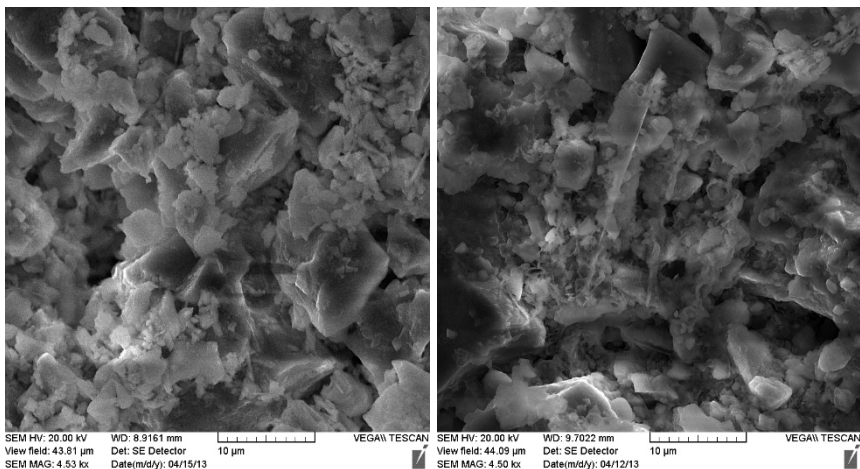


Рис. 4.10. Микроструктура цементного камня  
(увеличение  $\times 4530$  и  $\times 4500$ ):

*a* – образец без добавки

*б* – образец с добавкой ОГ (4,0 %)

Заполнение пор и капилляров увеличивает площадь контактных зон и повышает прочность цементного камня. Добавка ОГ увеличивает количество цементных зерен, вступающих в реакцию гидратации, и объем химически связанной воды. В цементном камне образуются многочисленные дополнительные коагуляционные контакты. Объем бентонита не должен превышать суммарный объем пор и капилляров. При превышении, его частицы внедряются между зернами цемента и препятствуют образованию кристаллизационных контактов.

При введении добавки ОГ в количестве 0,2–2,0 % от массы цемента, прочность цементного камня сопоставима с прочностью образцов без добавки. Разбежка в результатах измерений находится в пределах 11 % в сторону повышения прочности. Это объясняется образованием дополнительных коагуляционных контактов и уплотнением структуры. А при введении добавки ОГ в количестве 4,0 %, прочность ниже на всех сроках твердения (рис. 4.11, *a*).

Гидрофобная пленка ОГ на начальном этапе снижает скорость набора прочности образцов (см. рис. 4.11, *a*, 4.11, *б*), зерна цемента не агрегируются и вода затворения равномерно распределяется по всему

объему цементного теста. Сетчатое строение гидрофобных пленок ОМ, способствует фильтрации воды к цементным зернам, вызывая их набухание и дальнейшее раскрытие гидрофобных пленок. После их раскрытия, благодаря снижению агрегации, увеличивается количество цементных зерен, вступивших в реакцию гидратации, и происходит более интенсивный набор прочности. Это объясняет увеличение конструктивной зоны (зона «А»), с прочностью цементного камня с добавкой ОГ не ниже прочности цементного камня без добавки. Снижение агрегации цементных зерен и их равномерное смачивание, способствует более плотной упаковке и образованию дополнительных коагуляционных и кристаллизационных контактов, повышая прочность цементного камня.

При введении добавки ОГ в количестве более 2,0 % происходит уменьшение количества образующихся кристаллизационных контактов, и прочность цементного камня на сжатие становится ниже, чем у образцов без добавки (см. рис. 4.11, *а*). При введении 4,0 % добавки ОГ прочность на сжатие через 28-м суток составляет 79 % от прочности образцов без добавки.

Введение добавки ОГ в количестве 4,0 % повышает прочность сцепления цементного камня с поверхностью бетона ремонтируемой конструкции на 65 % по сравнению с образцами без добавки (см. рис. 4.11, *а*). Это можно объяснить уменьшением площади сечения и количества пор и капилляров (см. рис. 4.8, *б*) [52]. Как следствие, увеличивается площадь контакта цементного камня (ремонтного бетона) с бетоном конструкции, благодаря этому, на всей поверхности их соприкосновения образуются дополнительные коагуляционные контакты.

Повышению прочности сцепления способствует и увеличение подвижности цементного теста, благодаря которому усиливаются адсорбционные процессы, и цементный камень глубже проникает в поры и капилляры ремонтируемого бетона, принимая форму поверхности с образованием дополнительных контактов на стыке цементный камень – ремонтируемая бетонная поверхность. Следует обратить внимание, что снижение прочности цементного камня (ремонтного бетона) на растяжение не снижает прочность его сцепления с бетоном ремонтируемой конструкции до тех пор, пока оно выше.

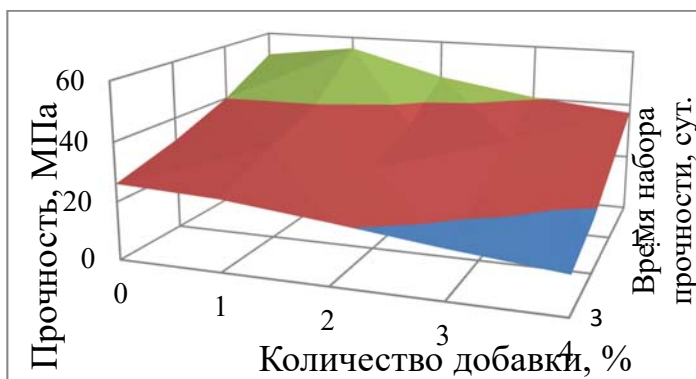
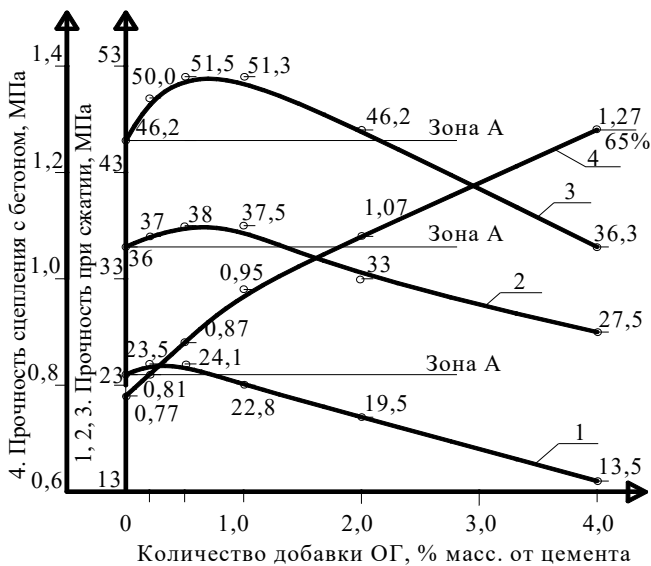


Рис. 4.11. Физико-технические свойства цементного камня с добавкой ОГ:

*a* – свойства цементного камня с добавкой ОГ  
 ось X – масса добавки ОГ, %; ось Y – прочность, МПа;

1, 2, 3 – прочность образцов на 2-, 14- и 28-е сутки;

4 – прочность сцепления с бетоном

*b* – изменение прочности цементного камня на сжатие ( $K_{нт} = 0,25$ )

Увеличение времени набора прочности (2, 14, 28 суток), увеличивает количество добавки ОГ, при котором прочность цементного камня с добавкой ОГ на сжатие, не ниже чем у цементного камня без добавки. График влияния времени и количества добавки ОГ на прочность цементного камня приведен на рис. 4.12.

Значения 23,5 МПа, 36,0 МПа и 46,2 МПа показывают точки, в которых прочность цементного камня с добавкой ОГ, равна прочности цементного камня без добавки. По мере увеличения времени набора прочности происходит увеличение количества добавки ОГ, не снижающее прочность цементного камня (рис. 4.12). Это позволяет предположить о возможности увеличения количества вводимой добавки ОГ при увеличении времени набора прочности свыше 28 суток, без снижения прочности ремонтного бетона на сжатие ниже прочности образцов без добавки.

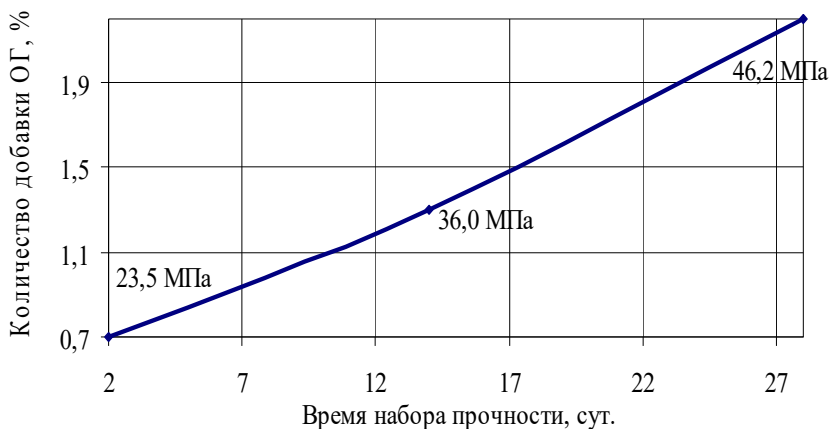


Рис. 4.12. Изменение прочности цементного камня в зависимости от времени и количества добавки ОГ

На рис. 4.13 представлены графики относительной скорости набора прочности цементного камня с добавкой ОГ в количестве 0,2–4,0 %. Прочность цементного камня без добавки в возрасте 28 суток принята в качестве начальной и равняется 100 %.

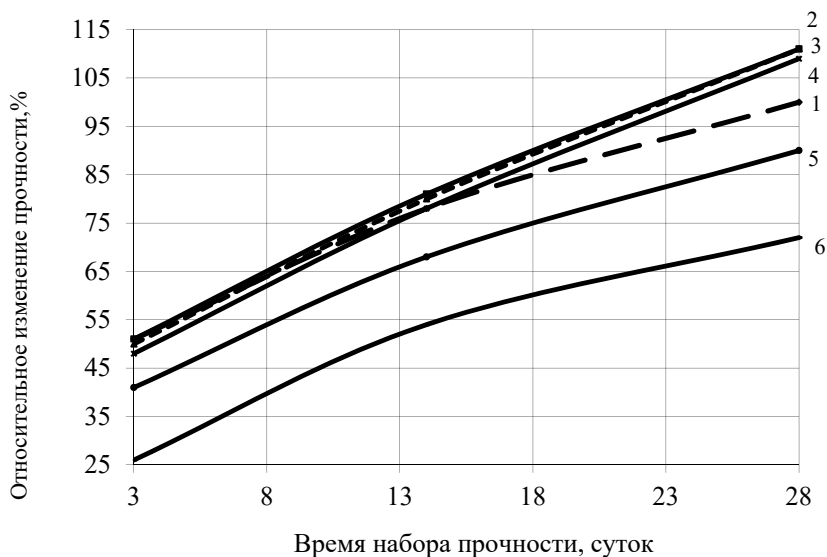


Рис. 4.13. Динамика набора прочности цементного камня  
 1 – бездобавочный образец;  
 2, 3, 4, 5, 6 – образцы с 0,2; 0,5; 1,0; 2,0; 4,0 % добавки ОГ

Следует отметить, что относительная скорость набора прочности цементного камня с добавкой ОГ в количестве до 2,0 %, сопоставима с набором прочности образцами без добавки. На вторые сутки при введении 1,0 % добавки ОГ – прочность составляет 94 %, а при 2,0 % – 80 % от прочности образцов без добавки.

#### 4.7. Влияние добавки отработанной глины на физико-технические свойства мелкозернистых ремонтных бетонов

Важнейшим показателем, в соответствии с предъявляемыми к ремонтным бетонам требованиями ТУ СТБ 1464, является прочность их сцепления с бетоном ремонтируемой конструкции. Для проверки соответствия разработанного ремонтного бетона данному требованию подготовили пять серий образцов, имеющих следующий состав: Ц/П/В = 500/1500/200. Добавку ОГ в данные составы вводили в количестве 0,2/ 0,5/ 1,0/ 2,0/ 4,0 % от массы цемента. Для



контроля и определения относительных изменений прочности сцепления, была изготовлена шестая серия образцов – без добавки (рис. 4.14).



Рис. 4.14. Подготовка образцов и определение прочности сцепления с бетоном

Добавка ОГ в количестве 4,0 % повышает прочность сцепления ремонтного бетона с бетоном ремонтируемой конструкции на 34 % (см. рис. 4.15) [52]. Данный эффект обусловлен увеличением подвижности смеси, диспергацией цементных зерен, повышением площади контакта ремонтных бетонов с бетоном конструкции, и увеличением количества точек контакта, между цементными зернами ремонтного бетона и бетоном конструкции. Замедление набора прочности на начальном этапе, снижает напряжения и препятствует образованию усадочных трещин. В дальнейшем набор прочности ремонтного бетона с добавкой ОГ идет быстрее, чем у образцов без добавки. Следует отметить, что образующиеся коагуляционные контакты подвижнее, чем кристаллизационные, что положительно

влияет на целостность и свойства восстановленного защитного слоя и совпадает с данными полученными Д. А. Кузиным [53].

На рис. 4.16 представлены данные по сравнению динамики изменения прочности сцепления цементного камня и мелкозернистого ремонтного бетона с бетоном ремонтируемой конструкции [75].

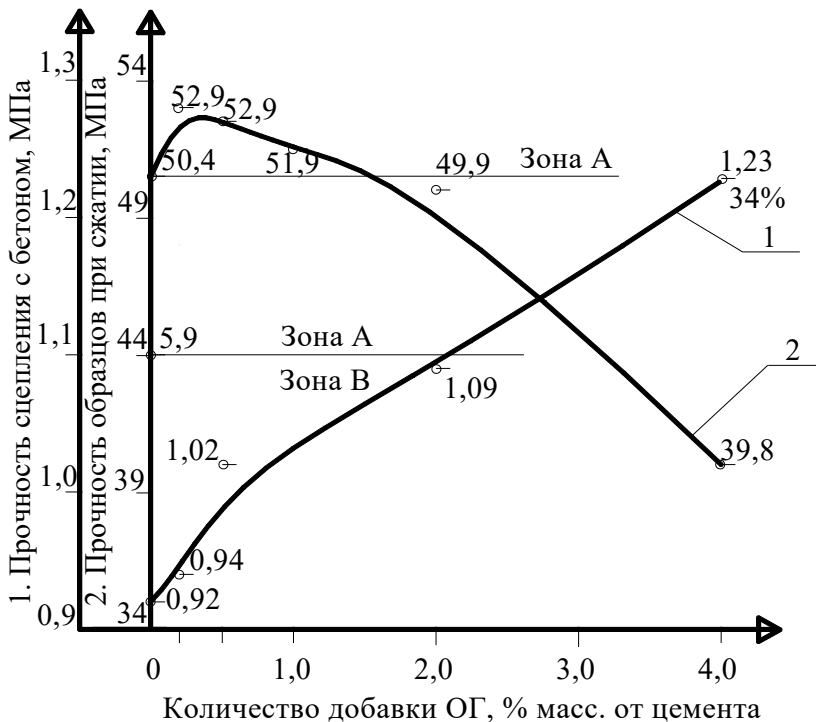


Рис. 4.15. Влияние добавки ОГ на прочность ремонтных бетонов (Ц/П/В = 500/1500/200):

1 – прочность сцепления с бетоном; 2 – прочность на сжатие

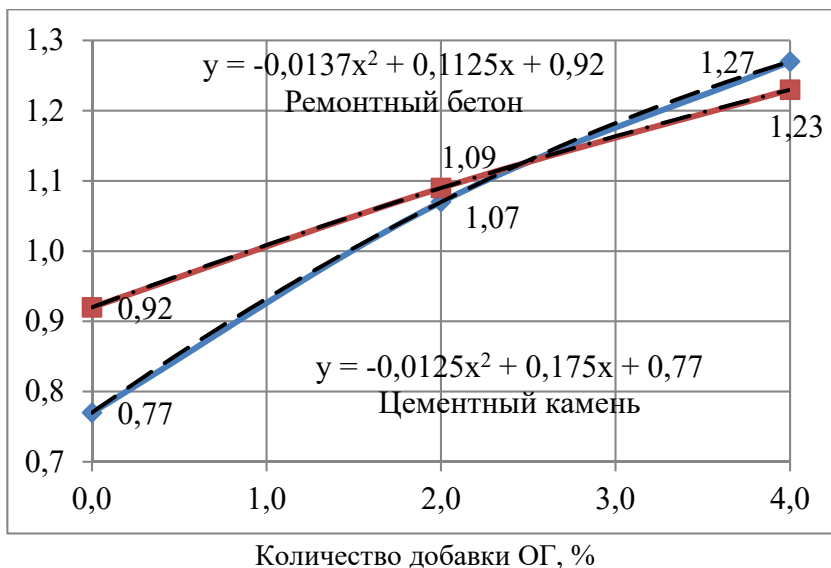


Рис. 4.16. Изменение прочности сцепления ремонтного бетона с бетоном восстанавливаемой конструкции

Различие в динамике роста прочности сцепления цементного камня и ремонтного бетона с бетонной поверхностью ремонтируемой конструкции, можно объяснить снижением агрегации цемента. Благодаря этому количество зерен цемента, а следовательно, и образующихся кристаллизационных и коагуляционных контактов на единицу площади контакта цементного камня выше, чем в ремонтном бетоне.

Следует также отметить, что добавка ОГ, вводимая в ремонтный бетон в количестве 0,2–2,0 %, не снижает прочность образцов на сжатие, а при ее введении в количестве 0,2–0,5 % прочность увеличивается на 110,2 % по отношению к прочности образцов без добавки (рис. 4.15). Это можно объяснить снижением агрегации, диспергацией крупных пор на более мелкие и образованием новых коагуляционных контактов между цементными зернами, при сохранении прочных кристаллизационных контактов.

#### 4.8. Влияние органоминеральной добавки отработанной глины на физико-технические свойства ремонтных бетонов с крупным заполнителем

Ремонт и восстановление защитного слоя большой толщины связаны с расходом значительного количества ремонтных смесей и составов. Поэтому оправданным может оказаться применение для этих целей ремонтных бетонных смесей.

Для исследования влияния добавки ОГ на ремонтные бетоны использован следующий состав бетонной смеси: цемент – 410 кг/м<sup>3</sup>, песок – 680 кг/м<sup>3</sup>, щебень – 1150 кг/м<sup>3</sup>, вода – 175 л. Добавку ОГ вводили в количестве 0,2–4,0 % от массы цемента.

Результаты исследований влияния добавки ОГ на подвижность бетонных смесей по осадке конуса представлены на рис. 4.17.

При увеличении количества добавки ОГ до 4,0 % осадка конуса изменяется при В/Ц=0,60 с 4 см до 15 см, а при В/Ц=0,55 с 1 см до 8 см (см. рис. 4.17). Повышение подвижности можно объяснить пластифицирующим действием высокодисперсного гидрофобизирующего бентонита. Для уменьшения величины осадки конуса следует сократить расход воды затворения, уменьшив водоцементное отношение.

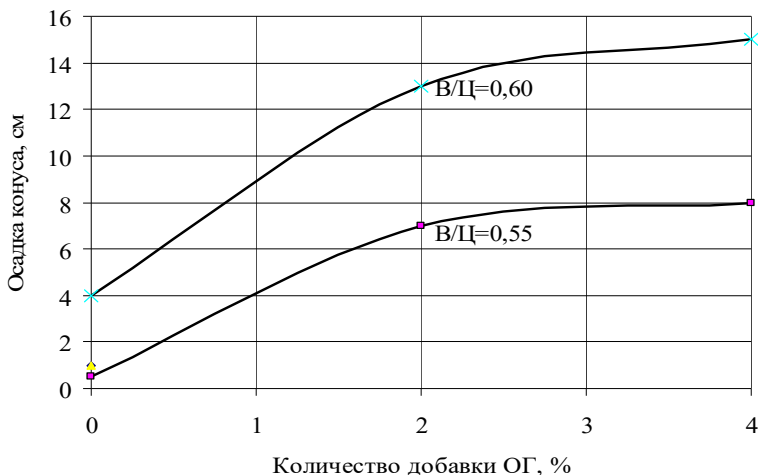


Рис. 4.17. Влияние добавки ОГ на осадку конуса

В процессе работы получены патенты на составы бетонных смесей: с добавкой ОГ – патент ВУ 10914 [54] и с добавкой бентонита, модифицированного ароматическими углеводородами в виде дистиллятного экстракта очистки нефтяной фракции – патент ВУ 12454 [50].

Добавку ОГ вводили в бетонные смеси в соответствии со способом приготовления бетонной смеси [49] и в составе ППК – патент 18440 [55]. Через 28 суток образцы испытывали на водопоглощение, водонепроницаемость, морозостойкость и прочность на сжатие (рис. 4.18) [56].

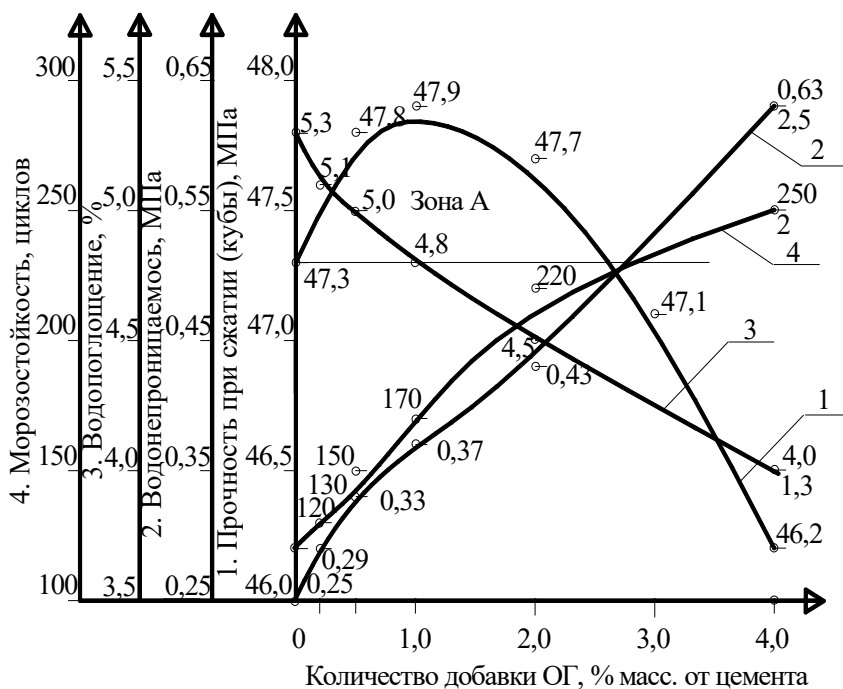


Рис. 4.18. Влияние добавки ОГ на свойства ремонтных бетонов:  
 1 – прочность кубов при сжатии; 2 – водонепроницаемость;  
 3 – водопоглощение; 4 – морозостойкость;

Введение добавки ОГ (в количестве 4,0 %) в ремонтные бетонные смеси повышает их водонепроницаемость в 2,5 раза и морозостойкость более чем в 2 раза, а также снижает водопоглощение более чем в 1,3 раза. При ее введении бентонит заполняет капиллярные поры и препятствует фильтрации влаги в бетон, а ОГ адсорбируется на стенках пор и капилляров, придает им водоотталкивающие свойства и частично способствует образованию замкнутых пор и капилляров. При этом прочность ремонтного бетона с добавкой ОГ в количестве до 3,0 % сопоставима с прочностью бетона без добавки [76].

В качестве базовых, для проведения ремонтных работ, рекомендованы составы ремонтных бетонов с добавкой ОГ в количестве 2,0–3,0 % от массы цемента. В данных составах сочетаются снижение водопоглощения с повышением водонепроницаемости и морозостойкости.

#### **4.9. Влияние органоминеральной добавки отработанной глины на коррозионное состояние стальной арматуры**

В процессе эксплуатации мостов и путепроводов в зимний период производится антикоррозийная обработка проезжей части. Используемые для этих целей агрессивные реагенты по порам и капиллярам проникают к стальной арматуре, вызывая ее коррозию. Для защиты арматуры применяют различные способы.

Согласно исследованиям В. С. Рамачандрана [8], при pH бетона выше 10 на поверхности арматуры возникает защитная пленка, которая защищает от коррозии. В случае если pH ниже 10, целостность пленки может быть нарушена, что вызывает развитие коррозии арматуры.

Надежную защиту арматуры дает снижение проницаемости защитного слоя. В этом случае агрессивные реагенты не проникают к арматуре, и она не подвергается коррозии от их воздействия.

Исследование влияния ремонтного бетона, модифицированного добавкой ОГ, на коррозию стальной арматуры проводили на предварительно обработанной калибровкой поверхности стержней из стали класса S240, диаметром 10 мм, а также из термомеханически упрочненной стали класса St500C, диаметром 25 мм, применяемых для железобетонных конструкций мостов и путепроводов.

Количественную оценку эффективности воздействия ремонтного бетона с добавкой ОГ на стальную арматуру определяли по материальным потерям металла и глубине коррозионных язв. В качестве испытательной среды использованы бетонные кубы (Ц:П:Щ =410:650:1150) и В/Ц = 0,4–0,5, прошедшие испытание на определение прочности на сжатие и переведенные в порошкообразное состояние путем их перетирания. Количество добавки ОГ варьировалось в пределах 0,2–4,0 % по массе от цемента.

Через определенные промежутки времени равные одной неделе, одному месяцу, шести месяцам и одному году, арматуру извлекали, промывали, промокали салфеткой, очищали от ржавчины и производили взвешивание на электронных весах. При проведении испытаний соблюдался режим периодического увлажнения и высушивания (1 сут. в воде и 6 сут. на воздухе). По результатам взвешиваний определяли потерю массы и изменение площади сечения арматуры.

Экспериментально установлено, что вещество добавки ОГ замедляет развитие процесса коррозии арматуры, особенно при ее введении в количестве 2,0–4,0 % от массы цемента. Так, при данном количестве добавки, через 4 недели с начала эксперимента масса арматурных стержней практически не изменилась. В тоже время в «бездобавочной» среде арматурные стержни потеряли до 3 г/м<sup>2</sup>. При увеличении срока эксперимента до 52 недель, потеря массы арматурных стержней составила 5–7 г/м<sup>2</sup> и до 40 г/м<sup>2</sup>, соответственно, для среды с добавкой в количестве 2,0–4,0 % от массы цемента и без добавки. Это связано с ростом плотности и непроницаемости структуры бетона за счет гидрофобизации поверхности пор и их коагуляции добавкой, что снижает диффузию и интенсивность воздействия агрессивных реагентов на арматуру.

#### **4.10. Основные факторы влияния органоминеральной добавки отработанной глины на цемент и ремонтные бетоны**

Основные этапы влияния добавки ОГ на цемент и ремонтные бетоны можно представить в следующем виде.

*1. Цемент.* Органическая масса адсорбируется на цементных зернах, создавая гидрофобные пленки, которые увеличивают срок хранения цемента.

*2. Цементное тесто и ремонтная бетонная смесь.* Гидрофобная пленка снижает агрегацию цементных зерен. Их гидратация в начальный период замедляется, что снижает внутренние напряжения. На следующем этапе вода, благодаря наличию разрывов и сетчатому строению гидрофобной пленки, взаимодействует с цементными зернами, вызывая их набухание. В результате целостность гидрофобных пленок нарушается еще больше и происходит равномерное смачивание цементных зерен по всему объему цементного камня, увеличивается количество вступивших в гидратацию цементных зерен.

Бентонит связывает часть воды и снижает водоцементное отношение, его высокодисперсные частицы размером 1–2 мкм мельче цементных зерен имеющих размер 20–30 мкм, что способствует максимально плотной упаковке. Бентонит снижает водоотделение и улучшает тиксотропные свойства, повышает связность, применяется в качестве водоудерживающей, сокращает расход цемента, повышает подвижность, применяется в качестве пластифицирующей добавки.

Органическая масса и гидрофобизированный бентонит улучшают удобоукладываемость, однородность, нерасслаиваемость ремонтной бетонной смеси, влияют на время схватывания и твердения.

*3. Цементный камень и бетон.* Гидрофобизированный бентонит повышает морозостойкость, прочность и водонепроницаемость, кольматирует капиллярные поры, защищает стальную арматуру от коррозии, увеличивает поверхность контакта частиц цемента между собой и с поверхностью, ремонтируемой и восстанавливаемой бетонной конструкции. Бентонит повышает прочность сцепления между цементными зернами и ремонтируемой конструкцией, предотвращает расклинивающее действие агрессивных растворов в трещинах на границе контакта минеральных и клинкерных матери-



алов с новообразованиями. Увеличивает трещиностойкость и снижает напряжения, возникающие при наборе прочности ремонтных бетонов на начальных этапах.

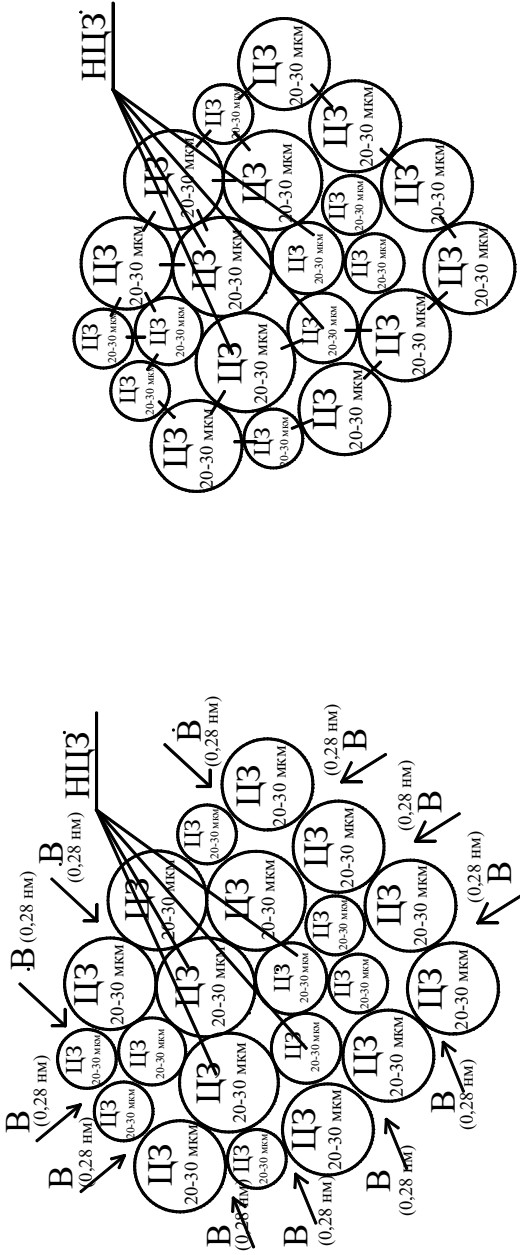
Органическая масса, адсорбируясь на поверхности пор, придает им гидрофобные свойства и образует на поверхности цементных зерен адсорбционные слои. Она повышает устойчивость ремонтных бетонов к воздействию агрессивных реагентов, способствует частичной замене жестких кристаллизационных контактов на подвижные конденсационные контакты.

Органическая масса и гидрофобизированный бентонит частично заполняют поры цементного камня, уплотняя структуру цементного камня. Снижается общая пористость, исчезают крупные поры, уменьшается водопоглощение. Гидрофобизация стенок пор и капилляров придает им водоотталкивающие свойства и снижает проницаемость, повышая коррозионную стойкость. Органическая масса способствует созданию новых подвижных коагуляционных контактов между кристаллогидратами, что положительно влияет на прочность сцепления ремонтного бетона с бетоном ремонтируемой конструкции.

Следует отметить тот факт, что влияние добавки ОГ на физико-технические характеристики ремонтных бетонов проявляется на всех этапах с момента ее введения и до завершения эксплуатации мостов и путепроводов. Она снижает негативное влияние, которое оказывает на ремонтный бетон вода и другие агрессивные реагенты, тем самым повышая долговечность конструкции.

Описание структуры порового пространства производят с использованием различных моделей: Адзуми, Власова, Дубинина, Виггса, спаянных кристаллов и др. В соответствии с ними, поры цементного камня представлены: микропорами размером до 100 нм, капиллярными порами размером от 100 нм до 10 мкм и воздушными порами размером от 50 мкм до 2 мм. Они оказывают влияние на физико-технические свойства цементного камня, такие как: водонепроницаемость, водопоглощение, морозостойкость и антикоррозионную защиту стальной арматуры.

Учитывая размеры частиц, составляющих цементный камень и имеющих следующие размеры: цементное зерно (ЦЗ) 20–30 мкм, бентонит (Б) 1–2 мкм, органическая масса (ОМ) 0,4–0,6 нм, молекула воды (В) 0,28 нм, упрощенную модель капиллярно пористого тела представим в виде модели спаянных кристаллов (рис. 4.19 и 4.20) [61].

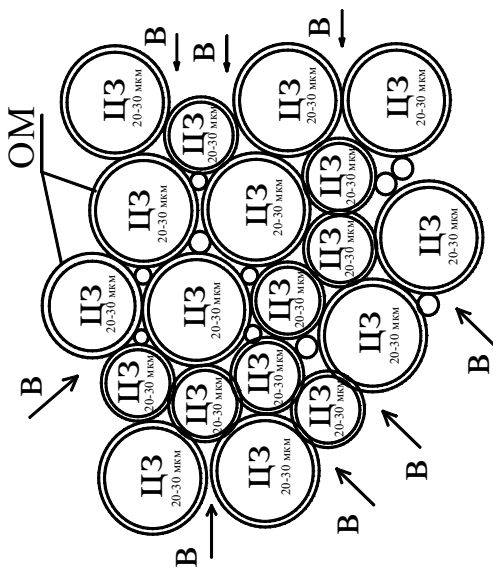
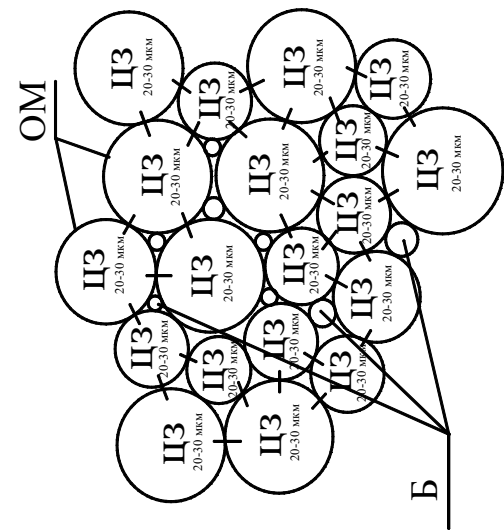


2 – цементный камень;

1 – цементное тесто;

Рис. 4.19. Упрощенная модель капиллярно-пористой системы в виде «модели спаянных кристаллов» (без добавки): соединения между цементными зернами обозначают кристаллизационные и коагуляционные контакты;

ЦЗ – цементное зерно, В – вода, НЦЗ – не прогидратировавшие зерна цемента



1 — цементное тесто;

2 — цементный камень;

Рис. 4.20. Упрощенная модель капиллярно-пористой системы в виде «модели спаянных кристаллов» (с добавкой ОГ):

соединения между цементными зёрнами обозначают кристаллизационные и коагуляционные контакты

Модели описания структуры порового пространства (см. рис. 4.19 и 4.20), можно объяснить следующим образом. В цементном камне без добавки вода затворения из-за агрегации смачивает не все цементные зерна, и они не в полном объеме вступают в гидратацию. Органическая масса добавки ОГ адсорбируется на цементных зернах, препятствуя их агрегации. Сетчатая оболочка ОМ замедляет скорость набора прочности на начальном этапе, и вода затворения смачивает цементные зерна равномерно и в полном объеме. После нарушения целостности оболочки ОМ образуются контакты между цементными зернами. Начальный этап набора прочности проходит медленнее, снижаются напряжения. ОМ с частицами 0,4–0,6 нм, адсорбируется на стенках пор и капилляров. Одновременно бентонит с размером частиц 1–2 мкм, заполняет пространство между зернами цемента размером 20–30 мкм [61].

#### **Выводы по главе 4**

1. Экспериментально обоснован 2-х ступенчатый способ приготовления бетона ремонтных составов, включающий приготовление «концентрата» добавки (в виде сухой смеси с цементом), а на второй ступени – введение «концентрата» в бетон, что обеспечивает равномерное распределение добавки отработанной глины в бетоне, его однородность и высокие качественные характеристики [52, 55].

2. Экспериментально доказана целесообразность приготовления «концентрата» путем предварительного введения добавки отработанной глины в цемент. Так, при хранении в закрытом помещении при температуре воздуха  $(20 \pm 5)$  °С и относительной влажности  $(70 \pm 20)$  % через 100 дней скомковалось до 83 % исходного цемента без добавки, а цемента, гидрофобизированного добавкой отработанной глины – не более, чем в количестве 4,0 % – 11,2 %, что в 7,4 раза меньше; через 360 дней хранения скомковалось 16,8 % гидрофобизированного цемента и 95 % бездобавочного, что отличается в 5,6 раза [56].

3. Доказана целесообразность предварительного смешивания добавки отработанной глины в соотношении  $(0,75–1,0)$  от массы цемента и цемента, с получением порошкообразного гидрофобного концентрата и последующим его введением в ремонтную бетонную смесь на второй ступени. В частности, на оптических микрофото-

графиях порошкообразного гидрофобного концентрата видно, что добавка отработанной глины при приготовлении «концентрата» равномерно перемешалась с цементом, при этом время хранения «концентрата» в экспериментах достигало трех лет без потери основных свойств [56].

4. Установлены зависимости начала, окончания и времени схватывания цементного теста от количества вводимой добавки отработанной глины, характеризующиеся замедлением процесса схватывания на начальном этапе и увеличением времени окончания схватывания до 8 % и продолжительности этого процесса до 16 %, что связано с адсорбцией органической составляющей добавки отработанной глины на поверхности цементных зерен [56].

5. Выявлено, что структура цементного камня с добавкой отработанной глины в количестве 0,2–4,0 %, характеризуется равномерным распределением мелких пор, размеры которых не превышают 5 мкм. При этом высокодисперсные частицы гидрофобизированного бентонита (размерами 1–2 мкм и менее) занимают свободное пространство вокруг более крупных остаточных «зерен» цемента (размерами 20–30 мкм). В целом структура образцов цементного камня с добавкой отработанной глины значительно плотнее, чем образцов без добавки при равном водоцементном отношении [52].

6. Установлено что, цементный камень с добавкой отработанной глины в количестве 0,2–1,0 % в возрасте свыше 28-и суток имеет прочность на 11 % выше, чем у образцов без нее; при введении 2,0 % добавки ОГ прочность цементного камня сопоставима с прочностью образцов без добавки, а при увеличении дозировки сверх 3,0 % (до 4,0 %) прочность на сжатие снижается, но одновременно выявлено, что добавка отработанной глины, вводимая в количестве до 4,0 % от массы цемента, повышает прочность сцепления ремонтного бетона с бетоном ремонтируемой конструкции на 65 % и более, по сравнению с образцами без добавки. В этой связи установлен оптимальный расход добавки отработанной глины, составивший 2–3 % от массы цемента, обеспечивающий рациональное сочетание прочности ремонтного бетона на сжатие и прочности сцепления слоев ремонтного бетона со «старым», т.е. ремонтируемым бетоном [52].

7. Экспериментальные исследования кинетики роста прочности цементного камня показали, что при введении добавки отработан-

ной глины в количестве до 2,0 % динамика роста прочности сопоставима таковой для образцов без добавки. Так на вторые сутки, при количестве добавки отработанной глины 1,0 % – прочность составляет 94 %, а при 2,0 % – 80 % от прочности образцов без добавки. Одновременно выявлено, что прочность сцепления слоев ремонтного бетона (важнейшего показателя ремонтных составов) возрастает с 0,77 МПа до 1,17 МПа при дозировке добавки в оптимальном (2,0–3,0 %) количестве [52, 57].

8. Разработаны и экспериментально обоснованы составы ремонтных бетонов с добавкой ОГ в количестве 2,0–3,0 % масс. от цемента для восстановления защитных слоев бетонных и железобетонных конструкций мостов и путепроводов. Экспериментально подтверждено, что введение добавки отработанной глины в ремонтные бетоны снижает водопоглощение на 10–15 %, повышает прочность сцепления с бетоном в 1,3–1,65 раза, водонепроницаемость в 2,0–2,5 раза и морозостойкость в 1,5–2,1 раза при сохранении требуемого уровня прочности на сжатие [52].

9. Установлено, что введение в ремонтные бетонные смеси добавки отработанной глины в количестве до 4,0 % от массы цемента, не только не вызывает коррозии стальной арматуры, но и способствует повышению защитной способности бетона по отношению к ней, что подтвердил опыт эксплуатации реальных мостовых конструкций, защитные слои которых были восстановлены разработанными составами и за которыми (глава 5) ведется наблюдение в течение почти 3-х лет [52, 57].

## ГЛАВА 5 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРИГОТОВЛЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ РЕМОНТНЫХ БЕТОНОВ

### 5.1 Технология приготовления и применения ремонтных бетонов с органоминеральной добавкой отработанной глины для восстановления защитного слоя железобетонных конструкций

В процессе эксплуатации защитный слой железобетонных конструкций разрушается от действия внешних агрессивных факторов. При продолжении эксплуатации без проведения ремонтных работ, происходит активная коррозия арматуры и преждевременный выход конструкций из строя. Данный вид дефектов характерен для подавляющего большинства мостов и путепроводов и требует значительных объемов ремонтных составов.

Для проведения ремонтно-восстановительных работ использовали ремонтные бетоны с добавкой ОГ [58], изготовленные в соответствии с ТУ ВУ 100354447/082–2011 [59].

В результате обследования конструкций пешеходного путепровода на станции Барановичи-Центральные составлена ведомость дефектов и разработаны рекомендации по их устранению.

В процессе эксплуатации произошло разрушение защитного слоя железобетонных конструкций, оголение и коррозия арматуры (рис. 5.1).



Рис. 5.1. Разрушение защитного слоя железобетонных лестниц

По результатам обследования разработаны рекомендации по восстановлению разрушенного защитного слоя лестничных сходов и стоек опор ремонтными бетонами с добавкой ОГ [58]. Проведение работ рекомендовано производить в соответствии с техническими условиями ТУ ВУ 100354447.082-2011 [59].

Ремонтные бетоны с добавкой ОГ [58] применены для восстановления защитного слоя при реконструкции моста через р. Свислочь автомобильной дороги Минск–Гомель. Мост построен в период с 1981 по 1983 годы по схеме 10×21 м. В качестве балок были применены цельно-перевозимые предварительно напряженные тавровые балки длиной 21 м. За время эксплуатации произошло разрушение защитного слоя и оголение арматуры железобетонных конструкций. Дальнейшая эксплуатация без проведения ремонтных работ, могла привести к снижению грузоподъемности и выходу сооружения из строя. В процессе реконструкции восстановлен защитный слой железобетонных конструкций.

Первоначально удалили разрушенный защитный слой опор и пролетных строений, зачистили арматуру от продуктов коррозии.

Ремонтные бетонные смеси готовили в требуемом объеме на строительной площадке с помощью мешалки, а малое количество в ведре, используя дрель с насадкой. Смесь наносилась на поврежденные участки опор штукатурным методом (рис. 5.2).



Рис. 5.2. Восстановление защитного слоя опоры ремонтными бетонными смесями с добавкой отработанной глины



Толщина слоя ремонтной бетонной смеси 3–5 см, ее состав приведен в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Состав ремонтной бетонной смеси

Наименование	Количество компонентов, кг/м <sup>3</sup>
Цемент	500
Песок	1500
Вода	200
Добавка ОГ, кг / %	8 (2,0 %)

После нанесения ремонтных бетонных смесей выполнялись работы по уходу за восстановленным участком. После схватывания поверхность ремонтного бетона увлажняли несколько раз в день в течение 3-х суток из расчета 1–3 л/м<sup>2</sup>. При температуре воздуха выше 25 °С поверхность обрабатывали пленкообразующими составами, а при невозможности увлажнения поверхности, ее закрывали влажной мешковиной, пленкой или слоем опилок.

Добавка ОГ вводилась в ремонтные бетонные смеси в составе ПГК. Состав добавки ОГ представлен в табл. 5.2.

Таблица 5.2.

Состав добавки ОГ

Наименование	Количество компонентов, кг/м <sup>3</sup>
Компоненты добавки ОГ:	8
неорганический (бентонит)	4,4
органический (ОМ):	3,6

При наблюдении за восстановленными участками защитного слоя опор моста в течение более 3-х лет, установлено, что трещины и другие дефекты в железобетонных конструкциях отсутствуют (рис. 5.3, 5.4). Что можно объяснить большей подвижностью коагуляционных контактов, которые снижают напряжения, возникающие в ремонтных бетонах, особенно на начальной стадии набора прочности.



Рис. 5.3. Защитный слой непосредственно после нанесения ремонтной бетонной смеси и через 90 суток



Рис. 5.4. Состояние защитного слоя через 14 и 27 месяцев

Ремонтные бетонные смеси с добавкой ОГ вводили в смесь для торкретирования (рис. 5.5). ПГК взвешивали на электронных весах в строительной лаборатории, фасовали в пластиковые ведра, закрывали крышкой и маркировали.



Рис. 5.5. Введение добавки ОГ в смесь для торкретирования пролетных строений

На рис. 5.6 показана готовая к применению ремонтная бетонная смесь с добавкой ОГ в количестве 2,0 % и ее подача к месту нанесения торкретбетона на русловой пролет. Наблюдение через 90 суток показало целостность защитного слоя.

Применение ремонтных бетонных смесей с добавкой ОГ обосновано низкой стоимостью (по сравнению с другими составами) при равноценном качестве. Их использование позволило восстановить геометрические характеристики, обеспечило нормальную эксплуатацию железобетонных конструкций и надежную защиту арматуры.



Рис. 5.6. Приготовление и подача ремонтной бетонной смеси к месту торкретирования



Рис. 5.7. Нанесение ремонтной бетонной смеси с добавкой ОГ на балки пролетного строения методом торкретирования

Проводимые в течение 3-х лет визуальные осмотры участков защитного слоя балок пролетных строений, восстановленных методом торкретирования ремонтными бетонами с добавкой ОГ, не выявили дефектов (рис. 5.8). По внешним признакам они, не отличались от аналогичных участков, восстановленных с применением ремонтной смеси Парад РСТ 6.



Рис. 5.8. Состояние поверхности торкрет-бетонного слоя через 27 месяцев после нанесения

Для снижения трудоемкости работ по ремонту и обследованию восстановленных пролетных строений мостов, могут быть применены подвесные подмости (рис. 5.9) [60].

Их применение, позволит отказаться от использования громоздких стационарных или дорогостоящих автомобильных люлек, которые к тому же (без проведения специальных работ) не могут использоваться для осмотра в русловой части сооружения.

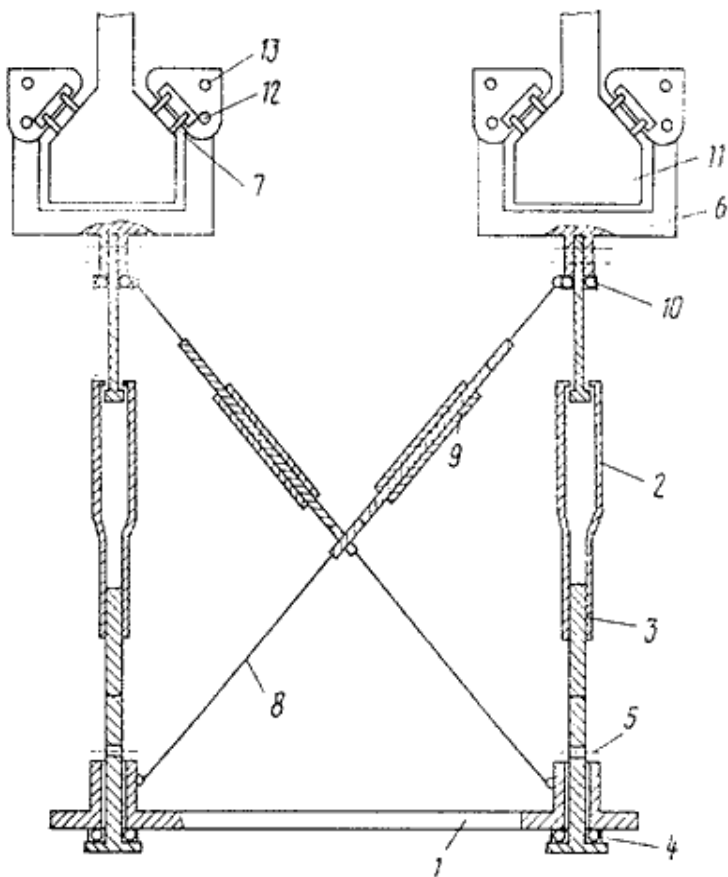


Рис. 5.9. Подвесные подмости для ремонта и обследования пролетных строений

Итоговая схема получения и применения ремонтных бетонов при восстановлении мостов и путепроводов представлена на рис. 5.10.



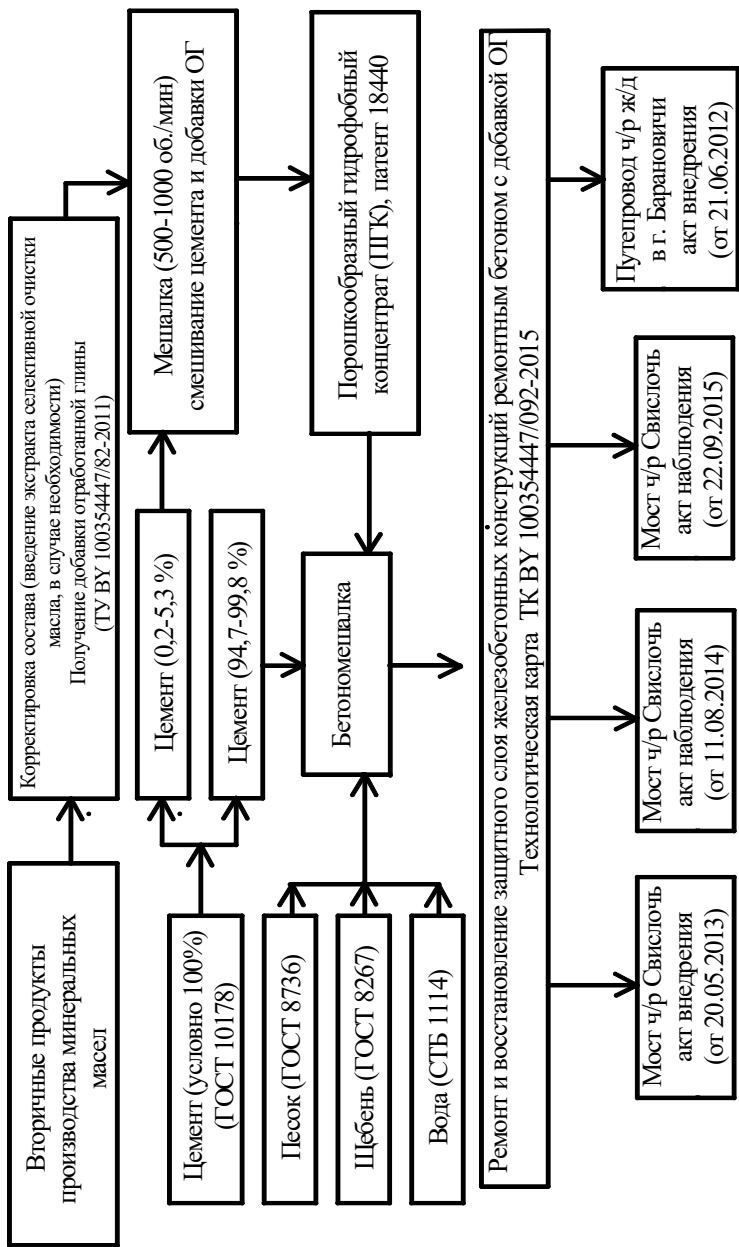


Рис. 5.10. Схема получения и применения ремонтных бетонов с добавкой ОГ

## 5.2 Расчет экономической эффективности применения составов ремонтных бетонов с добавкой отработанной глины

Экономический эффект ремонтно-восстановительных работ с применением бетонов, модифицированных добавкой ОГ, достигается за счет снижения себестоимости и повышения качества проведения работ.

Выполнено сравнение стоимости разработанных ремонтных бетонов и ремонтных составов марки Парад РС-3 и РСТ-6, применяемых ОАО «Мостострой» при капитальном ремонте объектов в 2014 году, соответственно в следующем количестве: РС-3 ~ 258,4 т и РСТ-6 ~ 167,9 т, ее суммарный объем (с учетом плотности ~ 2,2 т/м<sup>3</sup>), составил ~ 193,8 м<sup>3</sup>.

Стоимость ремонтной смеси Парад в соответствии с приказом Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь (по состоянию на 10.2014 г.) составляет: РС-3 – 5688 руб./кг, а РСТ-6 – 3244 руб./кг. Для получения из них 1 м<sup>3</sup> раствора необходимо ~ 1500 кг сухой смеси. В результате стоимость 1 м<sup>3</sup> РС-3 составит ~ 8532000 руб., а РСТ-6 ~ 4866000 руб.

Стоимость добавки ОГ складывается из следующих затрат.

Стоимость доставки из г. Новополоцк в г. Минск самосвалом МАЗ 5551 (паспортная грузоподъемность 10 т, объем кузова 5,5 м<sup>3</sup>) составляет 4578070 руб. При введении добавки ОГ в количестве 8,2 кг (2,0 % от массы цемента, принимаемой 410 кг/м<sup>3</sup>) суммарная масса добавки (при пересчете на годовую потребность 2014 г.) составит ~ 193,8 м<sup>3</sup> × 8,2 кг/м<sup>3</sup> ≈ 1590 кг, а стоимость доставки 1 кг – 4578070 / 1590 ≈ 2889 руб./кг, а для приготовления 1 м<sup>3</sup> ремонтного бетона ее стоимость составит 8,2 кг × 2889 руб./кг ≈ 23690 руб.

Стоимость работ, выполняемых экскаватором-погрузчиком, составляет 450000 руб./час и стоимость погрузки 1 кг добавки ОГ составит ~ 450 руб./кг, а 8,2 кг – ~ 3690 руб.

Расходы на изготовление порошкообразного гидрофобного концентрата в количестве 16,4 кг на 1 м<sup>3</sup> ремонтного бетона составят 47380 руб.

Расходы на изготовление 1 м<sup>3</sup> ремонтного бетона (со стоимостью материалов), в соответствии с калькуляцией составят 981856 руб./м<sup>3</sup> (с учетом стоимости материалов). Фактическая плотность ремонтного бетона составляет 2340 кг/м<sup>3</sup>.

В таблице 5.3 приведены расчеты суммарной стоимости ремонтной бетонной смеси и ремонтных смесей Парад РС-3 и РСТ-6 (из расчета затрат на 1 м<sup>3</sup> смеси).

Таблица 5.3

Сравнение стоимости добавки ОГ и ремонтных составов, применяемых ОАО «Мостострой»

Наименование	Стоимость		
	Парад РС-3	Парад РСТ-6	Добавка ОГ
Цена за 1 м <sup>3</sup> (без НДС)	5688×1500 = 8532000 руб.	3244×1500 = 4866000 руб.	Утилизируемый вторичный про- дукт производства
Доставка самосвалом, (за 8,2 кг на 1 м <sup>3</sup> ремонтного бетона)	С доставкой	С доставкой	23690 руб.
Погрузка на НПЗ г. Новополюцк (за 8,2 кг на 1 м <sup>3</sup> ремонтного бетона)			3690 руб.
Приготовление 1 м <sup>3</sup> ремонтного бетона			981856 руб.
Итого:	8532000 руб.	4866000 руб.	1056616 руб.

Сравнение стоимости: ремонтная смесь «Парад» – 4866000 руб./м<sup>3</sup>, разработанная ремонтная бетонная смесь с добавкой отработанной глины в количестве 2,0 % от массы цемента – 1056616 руб./м<sup>3</sup>. Следовательно, можно констатировать, что при замене ремонтной смеси «Парад» на предлагаемую ремонтную бетонную смесь, стоимость применяемых материалов снизится примерно в 4,6 раза.

## Выводы по главе 5

1. Разработаны технологические схемы получения и введения добавки отработанной глины в составы ремонтных бетонных смесей, соблюдение которых (включая рекомендованную последовательность и режимы 2-х ступенчатого способа введения) обеспечивает требуемые качественные характеристики ремонтного бетона [51, 52, 59].

2. Отработаны и прошли производственную апробацию два метода восстановления защитных слоев бетона ремонтируемых (восстанавливаемых) мостовых конструкций разработанными ремонтными бетонными смесями – оштукатуриванием и мокрым торкретированием (набрызгом).

Первым методом проведено восстановление защитного слоя на отдельных участках бетонных опор при реконструкции моста через р. Свислочь автомобильной дороги Минск – Гомель.

Вторым методом восстановлен защитный слой балок пролетного строения моста через р. Свислочь автомобильной дороги Минск – Гомель.

3. Наблюдение за восстановленными участками защитного слоя отремонтированных конструкций в течение 90 суток и через 14 и 27 месяцев показало отсутствие трещин или иных проявившихся дефектов.

4. Разработаны необходимые рекомендательные и нормативные документы на ремонтные бетоны с добавкой отработанной глины, предназначенные для ремонта дефектов, эксплуатируемых бетонных и железобетонных конструкций [51, 59].

5. Экономическая эффективность результатов исследований при проведении ремонтно-восстановительных работ с применением ремонтных бетонов, модифицированных добавкой отработанной глины из вторичных продуктов производства минеральных масел, достигается за счет снижения себестоимости ремонтного состава, применяемого для ремонта и восстановления защитного слоя железобетонных конструкций.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты монографии

1. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность получения новой добавки в ремонтные цементные бетоны, а также разработан способ ее получения из вторичных продуктов производства минеральных масел, отличающийся установленным содержанием бентонита в количестве ~ 55 % от ее массы, а также наличием высокомолекулярных органических соединений, включающих метаноафтеновые углеводороды (20,6–23,8 %), циклоароматические углеводороды (70,3–74,0 %) и смолы (5,4–5,9 %), которые равномерно распределены в бентоните и гидрофобизируют его, что в итоге обеспечивает снижение на 10–15 % водопоглощения ремонтного бетона, повышение в 2,0–2,5 раза его водонепроницаемости, в 1,5–2,1 раза морозостойкости, а также в 1,3–1,65 раза повышает прочность сцепления ремонтного бетона с бетоном ремонтируемых конструкций. Одновременно это позволяет эффективно использовать отход производства нефтеперерабатывающих предприятий Беларуси [34, 43–48, 51–53, 56, 57, 62–66].

2. Разработан новый двухступенчатый способ приготовления высококачественной ремонтной бетонной смеси, включающий на первой ступени приготовление гидрофобного концентрата – смеси цемента с откорректированной добавкой отработанной глины в соотношении: 1,0 / (0,75–1,0) по массе, получаемого путем интенсивного смешивания, при котором высокомолекулярные органические соединения, содержащиеся в отработанной глине, адсорбционно связываются с поверхностью клинкерных минералов цемента, что обеспечивает на 2-й ступени – при приготовлении ремонтной бетонной смеси, равномерное распределение в ней добавки отработанной глины [52, 55, 67].

3. Экспериментально обоснованно, что клинкерные минералы цемента:  $3\text{CaOSiO}_2$ ,  $2\text{CaOSiO}_2$ ,  $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$ ,  $4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$  при контакте с высокомолекулярными органическими соединениями адсорбируют их, обеспечивая равномерное распределение органоминеральной добавки в приготавливаемом на первой стадии порошкообразном гидрофобном концентрате, что, в свою очередь, обеспечивает однородность приготавливаемой на 2-й ступени бетонной смеси и качество ремонтного бетона. При этом добавка ОГ в

водной среде способствует диспергации агрегатов из цементных зерен (цементных флоккул), что сопровождается образованием дополнительных коагуляционных контактов, придающих цементной системе повышенные тиксотропные свойства и в дальнейшем обеспечивающих рост числа кристаллизационных контактов, а в итоге рост прочности сцепления слоев ремонтного и восстанавливаемого бетона в 1,3 и более раза [45, 50, 52, 56, 57, 62, 68–70].

4. Экспериментально обоснованы составы ремонтного бетона, модифицированного добавкой отработанной глины, и определены его физико-технические характеристики и свойства. Эффективность его применения подтверждается результатами эксплуатации восстановленных этими составами защитных слоев и отсутствием коррозии стальной арматуры железобетонных мостовых конструкций, за которыми ведется наблюдение в течение почти трех лет после их восстановления разработанными ремонтными бетонами [49, 50, 52, 54, 55, 57, 58, 61, 64–66, 71, 72].

5. Результаты производственной апробации разработанных составов ремонтного бетона, модифицированного добавкой отработанной глины, подтвердившие эффективность разработки [58, 59].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Результаты монографии рекомендуется использовать:

- при изучении состава и свойств иных вторичных продуктов производства минеральных масел с целью получения из них аналогичной добавки в составы ремонтных бетонных смесей, что позволит расширить область использования соответствующих техногенных отходов;
- при разработке соответствующих нормативных документов на бетоны, предназначенные для ремонтно-восстановительных работ защитного слоя железобетонных конструкций мостов, путепроводов и других инженерных сооружений;
- при практическом применении разработанной технологии введения добавки отработанной глины в составы ремонтных бетонных смесей и применения ремонтных бетонов, модифицированных этой добавкой, для ремонта эксплуатируемых конструкций;
- для разработки импортозамещающих ремонтных составов с целью снижения себестоимости проведения ремонтно-восстановительных работ.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Руководство по ремонту бетонных и железобетонных конструкций транспортных сооружений с учетом обеспечения совместимости материалов / Науч.-исслед. ин-т трансп. стр-ва. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : ЦНИИС, 2010. – 182 с.

2. Соломатов, В. И. Химическое сопротивление композиционных строительных материалов / В. И. Соломатов, В. П. Сеняев. – Москва : Стройиздат, 1987. – 264 с.

3. Бусел, А. В. Коррозия и несиловые факторы разрушения дорожно-строительных материалов. Способы защиты / А. В. Бусел, Н. П. Матвейко. – Минск : БНТУ, 2009. – 214 с.

4. Минин, А.В. Повышение долговечности мостов в агрессивных средах за счет использования эффективных химических и эмульсионно-минеральных материалов : дис. ... канд. техн. наук : А. В. Минин. – Минск, 2001. – 172 л.

5. Москвин, В. М. Коррозия бетона / В. М. Москвин. – Москва : государственное издательство по строительству и архитектуре, 1952. – 344 с.

6. Косинов, Е. А. Регулирование свойств цемента модифицированной гидрофобизирующей добавкой : авторефер. дис. ... канд. техн. наук / Е. А. Косинов. – Российский химико-технологич. ун-т им. Д. И. Менделеева. – Москва, 2010. – 16 с.

7. Розенталь, Н. К. Бетоны повышенной стойкости с полифункциональными добавками / Н. К. Розенталь // Бетон и железобетон. – 1982. – № 9. – С. 6–7.

8. Добавки в бетон : справ. пособие / В. С. Рамачандран [и др.] ; под ред. В. С. Рамачандрана. – Москва : Стройиздат, 1988. – 286 с.

9. Бабков, В. В. Аспекты формирования высокопрочных и долговечных цементных связей в технологии бетонов / В. В. Бабков, И. Ш. Каримов, П. Г. Комохов // Изв. вузов. Строительство. – 1996. – № 4. – С. 41–48.

10. Ольгинский, А. Г. Пылеватые минеральные добавки к цементным бетонам / А. Г. Ольгинский // Строительные материалы и конструкции. – 1990. – № 3. – С. 18.

11. Чехов, А. П. Защита строительных конструкций от коррозии : учебное пособие / А. П. Чехов. – Киев : Вища школа, 1977. – 216 с.

12. Розенталь, Н. К. Коррозионная стойкость цементных бетонов низкой и особо низкой проницаемости / Н. К. Розенталь. – Москва : ФГУП ЦПП, 2006. – 520 с.

13. Дворкин, Л. И. Строительные материалы из отходов : учебно-справочное пособие / Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин. – Ростов н/Д : Феникс, 2007. – 369 с.

14. Ратинов, В. Б. Добавки в бетон / В. Б. Ратинов, Т. И. Розенберг. – 2-е издание – Москва : Стройиздат, 1989. – 187 с.

15. Батраков, В. Г. Модифицированные бетоны : теория и практика / В. Г. Батраков. – 2-е изд., переработанное. – Москва : Технопроект, 1998. – 768 с.

16. Касторных, Л. И. Добавки в бетоны и строительные растворы / Л. И. Касторных. – Ростов на Дону.: Феникс, 2005. – 221 с.

17. Ребиндер, П. А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Коллоидная химия. Избранные труды / П. А. Ребиндер. – Москва : Наука, 1978. – 368 с.

18. Горчаков, Г. И. Строительные материалы / Г. И. Горчаков, Ю. М. Баженов. – Москва : Стройиздат, 1986. – 688 с.

19. Лайдабон, Ч. С. Поверхностная модификация бетонов высоковязкими составами : дис. ... докт. техн. наук: 05.23.05. / Ч. С. Лайдабон. – Иркутск, 2005. – 290 л.

20. Кузьменков, М. И. Вяжущие вещества и технология производства изделий на их основе : учеб. пособие / М. И. Кузьменков, Т. С. Куницкая. – Минск, 2003. – 224 с.

21. Добавки для бетона, раствора и инъекционного раствора. Часть 2. Добавки для бетона. Определения, требования, соответствие, маркировка и этикетирование : СТБ ЕН 934-2-2009. – Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь : РУП Стройтехнорм, 2010. – 21 с.

22. Технология строительного производства : учебник для вузов / Л. Д. Акимова [и др.] ; под ред. Г. М. Бадьина, А. В. Мещанинова. – 4-е изд., перераб. и доп. – Ленинград : Стройиздат, Ленингр. отд, 1987. – 606 с.

23. Бушнева, Е. Ю. Цементные растворы и бетоны с добавками модифицированных битумных эмульсий : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Е. Ю. Бушнева ; Российский химико-технологич. ун-т им. Д. И. Менделеева. – Москва, 2005. – 16 с.

24. Комплексная добавка для бетона : пат. 2230045 RU, МПК С 04 В 24/36, 26/26 / Е. С. Шитиков, Е. А. Ракитин, Л. А. Феднер; заявитель Е. С. Шитиков. – № а 2002114311/03 ; заявл. 04.06.02; опубл. 10.06.04. // Изобретения. Полезные модели. – 2004. – №. 16. – С. 326.



25. Соловьев, В. И. Бетоны с гидрофобизирующими добавками : Монография / В. И. Соловьев. – Алма-Ата : Наука КазССР, 1990. – 110 с.

26. Бондарь, Е. И. Интенсификация процессов твердения портландцементов малыми добавками глинистых минералов : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.11 / Е. И. Бондарь. – Киев, 1985. – 227 с.

27. Гранковский, И. Г. Структурообразование в минеральных вяжущих системах : монография / И. Г. Гранковский. – Киев : Наук. думка, 1984. – 300 с.

28. Яцына, В. Н. Влияние кальциевых черкасских бентонитов, обработанных содой, на водопроницаемость бетона : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / В. Н. Яцына ; Киевский ордена Ленина политехн. ин-т. – Киев, 1963. – 19 с.

29. Химич, Т. С. Модифицированная добавка бентонитовой глины для штукатурных растворов на основе портландцемента : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / Т. С. Химич. – Омск, 2006. – 170 с.

30. Банг, Н. Т. Повышение водонепроницаемости бетонного покрытия гидротехнических плотин в условиях влажного жаркого климата. На примере Вьетнама : дис. к. т. н. / Н. Т. Банг. – Москва, 2006 – 158 с.

31. Давидсон, М. Г. Новые способы повышения водонепроницаемости железобетонных сооружений / М. Г. Давидсон, Е. Д. Кузьмин. – Москва : Госстройиздат, 1957. – 86 с.

32. Строительный раствор : пат. RU 2129107, МПК, С 04 В 28/04, (С 04 В 28/04, С 04 В 14 : 06, 14 : 10) / В. Г. Комлев, Э. С. Акайзин, И. Д. Куркина ; заявитель Ивановская государственная химико-технологическая академия (RU). – № а 96114588/04 ; заявл. 18.07.96 опубл. 20.04.99 // Изобретения (Заявки и патенты). – 1999. – № 11. – С. 360.

33. Баженов, Ю. М. Структура и свойства бетонов с наномодификаторами на основе техногенных отходов / Ю. М. Баженов, Л. А. Алимов, В. В. Воронин. – Москва : МГСУ, 2013. – 204 с.

34. Ляхевич, Г. Д. Проблемы долговечности мостовых конструкций и пути ее повышения / Г. Д. Ляхевич, А. Л. Максименко, В. Г. Пастушков, В. А. Гречухин // Вест. Беларус. Нац. технич. ун-та. – 2004. – №4 – С. 5–8.

35. Справочник образующихся отходов производства в Белорусской ССР и их технических характеристик и имеющихся отечественных и зарубежных технологий по их переработке, а также идей и проблем по ресурсосбережению / Госснаб Белорусской

ССР. – Минск : [б. и.], 1990. – Ч. 2, разд. 3 : Образование и использование отходов на предприятиях Белорусской ССР в производстве строительных материалов. – 264 с.

36. Классификатор отходов, образующихся в Республике Беларусь. Группа IV. Отходы продуктов переработки нефти [Электронный ресурс] : прил. к постановлению М-ва природ. ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, 8 нояб. 2007 г., № 85 : в ред. постановления М-ва природ. ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 07.03.2012 г. // Консультант-Плюс. Беларусь / ООО «ЮрСпектр», Нац. центр правовой информ. Республики Беларусь. – Минск, 2015.

37. Обухова, С. А. Пути утилизации отработанных глинистых минералов процессов сорбционной очистки нефтеперерабатывающих предприятий / С. А. Обухова, С. Л. Ларионов, О. В. Горбан // Проблемы защиты окружающей среды на предприятиях нефтепереработки и нефтехимии : материалы науч.-практ. конф., 3-4 июня 1997 г. / Фирма Экологические Исследования (ЭЛИС). – Уфа, 1997. – С. 171–174.

38. Рыбак, Б. М. Анализ нефти и нефтепродуктов / Б. М. Рыбак. – Москва : Гостоптехиздат, 1962. – 888 с.

39. Технический анализ : учеб. пособие для техникумов / К. И. Гдовская [и др.]. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Москва : Высш. шк., 1972. – 488 с.

40. Губен–Вейль. Методы органической химии : методы анализа / Губен–Вейль. – Пер. с нем. – 2-е изд. – Москва : Химия, 1967. – 1033 с.

41. Гун, Р. Б. Нефтяные битумы / Р. Б. Гун. – М. : Химия, 1973. – 429 с.

42. Ляхевич, Г. Д. Исследование высокомолекулярных соединений нефти методом ИК-спектроскопии / Г. Д. Ляхевич, П. А. Ступаков // Химия и технология топлив и масел. – 1981. – № 7. – С. 56–59.

43. Гречухин, В. А. Предпосылки к использованию глинистых минералов и органических веществ в качестве добавок в бетонные смеси. / В. А. Гречухин, Г. Д. Ляхевич // Строительная наука и техника. – 2010. – № 3 (30). – С. 48–51.

44. Ляхевич, Г. Д. Исследование отработанной глины от производства минеральных масел. / Г. Д. Ляхевич, В. А. Гречухин, А. Г. Ляхевич // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2003. – №2. – С. 91–94.

45. Ляхевич, Г. Д. О возможности использования отработанной глины масляного производства. / Г. Д. Ляхевич, В. А. Гречухин, А. Г. Ляхевич // Химия и технология топлив и масел. – 2006. – №6. С. 33–35.
46. Шенк, Х. Теория инженерного эксперимента / Х. Шенк. – Москва : Мир, 1972. – С. 382.
47. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Гранковский. – 2-е изд. перераб. и дополн. – Москва : Наука, 1976. – С. 280.
48. Красовский, Г. И. Планирование эксперимента / Г. И. Красовский, Г. Ф. Филаретов. – Минск : БГУ, 1982. – 302 с.
49. Способ приготовления бетонной смеси : пат. 11645 Респ. Беларусь, МПК7 С 04 В 40/00 , С 04 В 28/00 / Г. Д. Ляхевич, В. А. Гречухин; заявитель Белорусский национальный технический университет. – № а 20060639 ; заявл. 27.06.06 ; опубл. 28.02.08 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 1 (66). – С. 80.
50. Бетонная смесь : пат. 12454 Респ. Беларусь, МПК7 С 04 В 28/00 / Г. Д. Ляхевич, В. А. Гречухин ; заявитель Белорусский национальный технический университет. – № а 20080858 ; заявл. 27.06.08 ; опубл. 30.10.09 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 5 (70). – С. 75.
51. Ремонт и восстановление защитного слоя железобетонных конструкций ремонтным бетоном, модифицированным вторичными продуктами производства минеральных масел : технологическая карта ТК ВУ 100354447/092-2015. – Минск : Белорус. нац. технич. университет, 2015. – 37 с.
52. Гречухин, В. А. Ремонтные бетоны с добавкой из вторичных продуктов производства минеральных масел / В. А. Гречухин // Вестник Полоцкого госуниверситета. Сер. Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2015. – №1. – С. 120–126.
53. Кузин, Д. А. Внутренняя цементно-песчаная облицовка стальных водопроводов : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Д. А. Кузин ; Самарский архитектурно-строит. ин-т. – Самара, 1993. – 22 с.
54. Бетонная смесь : пат. 10914 Респ. Беларусь, МПК7 С 04 В 22/00 , С 04 В 24/00 / Г. Д. Ляхевич, В. А. Гречухин ; заявитель Белорусский национальный технический университет. – № а 20041259 ; заявл. 30.12.04 ; опубл. 30.06.06 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 4 (63). – С. 88.

55. Способ приготовления бетонной смеси : пат. 18440, МПК7 С 04 В 28/02 / В. А. Гречухин ; заявитель Белорусский национальный технический университет. – № а 20120627 ; заявл. 17.04.12 ; опубл. 09.04.14 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 6. – С. 22.

56. Гречухин, В. А. Влияние отработанной глины на свойства цемента / В. А. Гречухин // «Автомобильные дороги и мосты». – 2012. – № 9. – С. 75–79.

57. Гречухин, В. А. Улучшение свойств бетона на основе применения новой добавки / В. А. Гречухин // «Наука и техника». – 2012. – №5. – С. 47–51.

58. Строительная композиция : пат. 12463, МПК7 С 04 В 24/00 / Г. Д. Ляхевич, В. А. Гречухин ; заявитель Белорусский национальный технический университет. – № а 20080856 ; заявл. 27.06.08; опубл. 30.10.09 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 5 (70). – С. 74.

59. Добавка гидрофобизирующе-кольматирующая для бетонных смесей и строительных растворов : Технические условия ТУ ВУ 100354447.082-2011. – Минск : Белорус. нац. технич. университет, 2011. – 9 с.

60. Подвесные подмости для ремонта и обследования пролетных строений мостов : а. с. 1581807 СССР, МПК5 Е 01 D 19/10 / Л. К. Лукша, В. А. Гречухин, А. Н. Юшкевич ; Белорусский политехнический институт – № 4621147 ; заявл. 19.12.88 ; опубл. 30.07.90 // Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки. – 1990. – № 28.

61. Гречухин, В. А. Упрощенная модель капиллярно-пористой системы цементного камня с добавкой отработанной глины масляного производства / В. А. Гречухин // Наука – образованию, производству, экономике : материалы Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 2015 / Белорус. нац. технич. ун-т. – Минск, 2015. – С. 142–144.

62. Ляхевич, Г. Д. Теоретические аспекты влияния глинистых минералов на бетонные и железобетонные строительные конструкции / Г. Д. Ляхевич, В. А. Гречухин // Архитектура, строительство, транспортные коммуникации, аграрно-технические и аграрно-инженерные науки : тезисы докладов Республ. науч.-технич. конф. студентов и аспирантов. Часть 4, Минск, 9–10 декабря 2003 г. Белорус. нац. технич. ун-т ; Б. М. Хрусталева [и др.]. – Минск, 2003. – С. 138–139.

63. Ляхевич, Г. Д. Теоретическое обоснование выбора гидроизоляции для мостов, подверженных вибрационному воздействию /

Г. Д. Ляхевич, А. Л. Максименко, В. А. Гречухин // Наука – образованию, производству, экономике : рефераты докладов Междунар. науч.-технич. конф. Том 2, Минск, 4–7 февраля 2003 г. / Белорус. нац. технич. ун-т ; Б. М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2003. – С. 19.

64. Гречухин, В. А. Пути снижения проницаемости бетонных конструкций / В. А. Гречухин // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 2-й Международной научно-технической конференции, Минск, 24–28 мая 2004 г. / Белорус. нац. технич. ун-т ; редкол.: Б. М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2004. – С. 383–387.

65. Ляхевич, Г. Д. Создание бетона повышенной водонепроницаемости с использованием модифицированных глинистых минералов / Г. Д. Ляхевич, В. А. Гречухин // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 5-й Международной научно-технической конференции. Том 1, Минск, 2007 г. / Белорус. нац. технич. ун-т ; редкол.: Б. М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2007. – С. 515–517.

66. Ляхевич, Г. Д. Свойства бетона с добавкой отработанной глины масляного производства / Г. Д. Ляхевич, В. А. Гречухин // Наука – образованию, производству, экономике. Инновационные технологии в строительстве автомобильных дорог мостов и посвященной 50-летию начала подготовки инженерных кадров в Республике Беларусь : материалы 6-ой Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 17-18 декабря 2008 г. / Белорус. нац. технич. ун-т ; редкол.: И. И. Леонович [и др.]. – Минск, 2008. – С. 308–315.

67. Гречухин, В. А. Гидрофобный цемент и способы его получения / В. А. Гречухин // Перспективные направления проектирования, строительства и эксплуатации дорог, мостов и подземных сооружений : Перспективные направления проектирования, строительства и эксплуатации дорог, мостов и подземных сооружений : Междунар. науч.-практич. конф. посвящ. 90-летию Белорус. нац. техн. ун-та. Часть 1, Минск, 21–22 октября 2010 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: И. И. Леонович [и др.]. – Минск, 2010. – С. 252–257.

68. Ляхевич, Г. Д. Физико-механические свойства глинистых минералов / Г. Д. Ляхевич, В. А. Гречухин // Архитектура, строительство, транспортные коммуникации, аграрно-технические и аграрно-инженерные науки : тезисы докладов Республ. науч.-технич. конф. студентов и аспирантов. Часть 4, Минск, 9–10 декабря 2003 г. Белорус. нац. технич. ун-т ; Б. М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2003. – С. 139–140.

69. Гречухин, В. А. Восстановление защитного слоя бетонных конструкций цементно-песчаным составом с добавкой / В. А. Гречухин // Инновационные материалы, технологии и оборудование для строительства современных транспортных сооружений : сборник докладов Междунар. науч.-практич. конф. Часть 1, Белгород, 2013 г. / Белгородский гос.-техн. ун-т им. В. Г. Шухова. – Белгород, 2013. – С 125–132.

70. Гречухин, В. А. Гидрофобизация цемента комплексной высокодисперсной добавкой / В. А. Гречухин // Проблемы повышения качества и ресурсосбережения в дорожной отрасли : сборник трудов Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 30–31 мая 2013 г. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2013. – С. 73–77.

71. Гречухин, В. А. Гидрофобные бетоны для ремонта мостов и путепроводов / В. А. Гречухин // Наука – образованию, производству, экономике : материалы Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 2014 / Белорус. нац. технич. ун-т. – Минск, 2014. – С. 184.

72. Гречухин, В. А. Цементно-песчаные ремонтные составы с отработанной глиной / В. А. Гречухин // Наука – образованию, производству, экономике : материалы Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 2014 / Белорус. нац. технич. ун-т. – Минск, 2014. – С. 185–186.

73. Гречухин, В. А. Структура цементного камня с добавкой из вторичных продуктов производства минеральных масел / В. А. Гречухин // Наука – образованию, производству, экономике : материалы Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 2015 / Белорус. нац. технич. ун-т. – Минск, 2015. – С. 141–142.

74. Гречухин, В. А. Гидрофобный цемент с добавкой отработанной глины / В. А. Гречухин // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 14-й Международной научно-технической конференции. – Минск : БНТУ, 2016. – Т. 3. – С. 94.

75. Гречухин, В. А. Цементно-песчаные ремонтные составы с отработанной глиной / В. А. Гречухин // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 12-й Международной научно-технической конференции. Т. 3. – Минск : БНТУ, 2014. – С. 185–186.

76. Гречухин, В. А. Гидрофобные бетоны для ремонта мостов и путепроводов / В. А. Гречухин // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 12-й Международной научно-технической конференции. Т. 3. – Минск : БНТУ, 2014. – С. 184–185.

Научное издание

**Гречухин Владимир Александрович  
Ляхевич Генрих Деонисьевич**

**ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛЫ  
ДЛЯ РЕМОНТА МОСТОВ И ТОННЕЛЕЙ**

*В авторской редакции*

Подписано в печать 28.04.2021. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Цифровая печать.  
Усл. печ. л. 7,38. Уч.-изд. л. 5,77. Тираж 100. Заказ 186.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет. Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.