

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ЛИПЕЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**На правах рукописи**



**КОМАРИЧЕВ АРТЕМ ВИКТОРОВИЧ**

**КОМПОЗИЦИОННЫЕ ИНЪЕКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ  
С АКТИВИРОВАННЫМИ СИСТЕМАМИ ТВЕРДЕНИЯ**

**Специальность 05.23.05 – Строительные материалы и изделия**

**Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**



**Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
доцент Гончарова Маргарита  
Александровна**

**Липецк – 2017**

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ.	
ПРОБЛЕМЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ ЗАПОЛНЕНИИ ТОНКИХ ТРЕЩИН (В НАРУЖНОМ КОНТУРЕ ГЕРМЕТИЗАЦИИ ЗАЩИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ И В ЖИЛИЩНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ).....	14
1.1 Проблемы заделки трещин в наружных железобетонных ограждающих конструкциях защитных сооружений. Анализ инъекционных материалов, использующихся при этом.....	14
1.2 Активация цементных систем твердения как фактор управления синте- зом композитов с заранее заданными свойствами.....	17
1.3 Анализ возможности использования тонкодисперсного конверторного шлака в качестве наполнителя для ЦКИМ.....	23
1.4 Оценка целесообразности применения в качестве наполнителя ЦКИМ продуктов обточки стали абразивным инструментом.....	25
1.5 Теоретические представления о структурообразовании цементных ком- позиционных инъекционных материалов ЦКИМ.....	27
2 ОБЪЕКТЫ, МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ И РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА.....	42
2.1 Исходные материалы, анализ их свойств и требований, предъявляемых к ним.....	46
2.2 Программа экспериментальных исследований и оборудование для опре- деления свойств ЦКИМ.....	46
2.3 Методики определения прочностных свойств цементных композицион- ных инъекционных материалов.....	48
2.4 Методика оценки адгезионных свойств ЦКИМ.....	50
2.5 Методика определения удельной поверхности и диаметра частиц ферромагнитного наполнителя.....	52
2.6 Методика определения газонепроницаемости (герметичности)	

трещин на поверхностях раздела металл-бетон (бетон-бетон).....	54
2.7 Методика оценки магнитной индукции на поверхности металла от источника внешнего локального магнитного поля.....	57
2.8 Измерение магнитной индукции в полости катушки для оценки параметров активирования воды и ЦКИМ.....	58
2.9 Методика оценки усадочных деформаций ЦКИМ.....	59
2.10 Исследования магнитной восприимчивости ЦКИМ.....	60
2.11 Методика оценки напряжений сдвига смесей ЦКИМ.....	61
2.12 Математическое планирование экспериментов.....	63
3 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СВОЙСТВ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ИНЪЕКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	66
3.1 Оценка прочностных, адгезионных свойств ЦКИМ с наполнителями из конвертерного шлака и отходов обработки металлов абразивным инстру- ментом.....	66
3.2 Определение оптимального значения силы тока в обмотке электромагнита устройства активации воды.....	82
3.3 Оценка значимости двухэтапной магнитной обработки воды и водных систем смесей ЦКИМ.....	83
4 ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВОВ И ОЦЕНКА СТРОИТЕЛЬНО-ТЕХНИЧЕ- СКИХ СВОЙСТВ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ИНЪЕКЦИОН- НЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	87
4.1 Результаты планирования эксперимента по оптимизации составов цементно-песчаных ЦКИМ для заделки широких трещин.....	87
4.2 Результаты планирования эксперимента по оптимизации составов цементно-водных ЦКИМ для заделки узких трещин.....	93
4.3 Исследование реологических свойств оптимальных составов.....	101
4.4 Оценка объемных деформаций усадки ЦКИМ в процессе их твердения .	104
4.5 Результаты экспериментальных исследований параметров	

локального магнитного поля в контактной зоне металл-бетон.....	106
5 ТЕХНОЛОГИЯ ИНЪЕКЦИОННОГО УПЛОТНЕНИЯ БЕТОНА ЦЕ- МЕНТНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ИНЪЕКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, АКТИВИРОВАННЫМИ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ.....	115
5.1 Механизмы трещинообразования в бетонных ограждающих конструк- циях на контактных поверхностях бетон-бетон.....	115
5.2 Механизмы трещинообразования в бетонных ограждающих конструк- циях на контактных поверхностях металл-бетон.....	121
5.3 Особенности технологии инъекционного уплотнения мест контакта ме- талл-бетон смесями, активированными магнитным полем.....	127
5.4 Теоретические предпосылки и анализ результатов данных экспериментальных исследований воздухопроницаемости ЦКИМ как пара- метра оценки качества тампонажных работ.....	130
5.5 Техничко-экономическая эффективность работ по инъекционному за- полнению трещин в железобетонных конструкциях.....	135
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	129
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	143
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	165
Приложение А. Технический акт внедрения (ООО «ЛипецкНИЦстройпроект»).....	166
Приложение Б. Технический акт внедрения (ООО «Промизделия»).....	167
Приложение В. Технический акт внедрения (ООО «Хай-Тек») .....	168
Приложение Г. Акт внедрения результатов научно-исследовательской ра- боты в учебный процесс.....	169

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время при строительстве, ремонте и реконструкции промышленных и гражданских зданий различного функционального назначения возникает проблема уплотнения усадочных швов, заделки трещин и пустот в железобетонных конструкциях и в кирпичной кладке, укрепления и повышения водонепроницаемости фундаментов и оснований, заполнения узких трещин в вертикальных стыках крупнопанельных зданий, а также в монолитных железобетонных конструкциях транспортных сооружений (тоннелей, мостов и других). Как известно, надежность, работоспособность и жесткость строительных конструкций во многом зависят от качества исполнения инъекционных работ и применяемых материалов. Кроме того, в процессе специального строительства для нужд Вооруженных Сил страны и Гражданской обороны проблема создания непроницаемого контура в защитных сооружениях (ЗС) является остро актуальной задачей: вертикальные трещины и пустоты, образовавшиеся в результате деформационных процессов разного генезиса, а также из-за входов и вводов инженерных коммуникаций в ограждающие конструкции, могут являться причиной проникновения во внутреннее пространство сооружений опасной наружной среды.

Для этих целей в Липецком государственном техническом университете были разработаны магнитные герметизирующие композиционные материалы (МГКМ) на основе эпоксидных смол. Однако, применение МГКМ в специальном строительстве проблематично (из-за относительно низкой тепло- и огнестойкости), а в гражданском - экономически неэффективно. Оптимальным решением этой задачи является использование в качестве герметизирующего материала цементных композитов. Существующая технология инъектирования трещин и пустот в зоне контактных поверхностей «бетон-бетон» в вертикальных стыках железобетонных конструкций, а также фундаментов и «металл-бетон» в ограждающих конструкциях ЗС способом цементации имеет ряд существенных недостатков. Сущность такого способа заключается в длительном пропуске через трещины цементных

смесей с высоким содержанием воды, в результате чего цементный раствор медленно твердеет, «закупоривая» дефектные места. Такой способ не обеспечивает необходимую степень герметичности ЗС, так как в процессе закачивания очередной порции раствора с высокой подвижностью, структура цементного камня получается достаточно пористой, что негативно сказывается на прочности всей системы в целом. Кроме того, такая технология предусматривает высокий расход не только компонентов раствора, но и электроэнергии. Очевидно, что для снижения затрат и улучшения качества инъекционных работ требуются новые материалы и технологии.

Таким образом, для решения данной проблемы необходимо предложить составы цементных композиционных инъекционных материалов (ЦКИМ), обладающих заранее заданными прочностными, реологическими и другими строительно-техническими свойствами. При этом необходимо учитывать, что ЦКИМ представляют собой водные эмульсии и суспензии, нередко подвергающиеся коалесценции, что приводит к потере агрегативной устойчивости композиций. Для предотвращения расслоения в составы вводят поверхностно-активные вещества, которые существенно повышают стоимость такой технологии. Следовательно, составы ЦКИМ и технология их применения должны быть максимально эффективными и экономичными.

При этом очевидным решением, обеспечивающим эффективность новой технологии их нагнетания в вертикальные узкие трещины, является жидкофазная активация систем твердения за счет действия магнитных полей. Тем более, что в некоторых случаях (например, для создания непроницаемого контура в защитных сооружениях) магнитное поле является необходимым технологическим параметром, обеспечивающим герметичность конструкций в целом. В таких условиях обязательным компонентом, гарантирующим стабильность цементных композиционных инъекционных материалов, является ферромагнитный наполнитель. При этом с целью снижения стоимости разработанных составов принято решение использовать отходы металлургического производства ПАО «Новолипецкий МК» – сталепла-

вильные (конвертерные) шлаки и продукты обточки металла электрокорундом, которые являются актуальным альтернативным сырьевым ресурсом Липецкого региона. Тем более это актуально в год экологии, так как известно, что в настоящее время, несмотря на прилагаемые усилия, проблема применения в строительстве техногенного сырья до сих пор не решена не только в Липецком регионе, но и в России в целом. При этом решаются сразу две задачи: использование вместо природного техногенного сырья и производство строительных материалов и изделий на их основе, а также значительное снижение экологической нагрузки на регион с развитой промышленностью (в том числе за счет устранения или уменьшения складирования невостребованных отходов).

**Степень разработанности темы исследования.** В работе над диссертационными исследованиями автор базировался на научных трудах в области структурообразования цементных композитов следующих отечественных и зарубежных ученых: Акуловой М.В., Атабекова Г.И., Ахвердова И.Н., Баженова Ю.М., Бессонова Л.А., Биндер К., Болотских Н.С., Буданова А.Р., Бочарникова А.С., Боровской С.Н., Глебова А.Р., Гончаровой М.А., Деева И.С., Ерофеева В.Т., Заварова В.А., Золоторубова Д.Ю., Калашникова В.И., Комохова П.Г., Корнеева А.Д., Коротких Д.Н., Крока Р., Ландау Л.Д., Липатова Ю.С., Литвинова И.М., Ли Х., Лосье А., Малиновского М.С., Макридина Н.И., Матвиевского А.А., Огороднева Б.Е., Пакен А.М., Прошина А.П., Слободкина Д.О., Соломатова В.И., Смирнова А.П., Федосова С.В., Фрейдина А.С., Френкеля Я.И., Фолимагиной О.В., Чернышова Е.М., Шкловского Б.И., Шмитько Е.И., Штауфер Д. и других.

В диссертации учитывались теоретические и методологические теории предшественников, но акценты были сделаны на нерешенных проблемах улучшения свойств специальных растворов за счет жидкофазной активации компонентов бетонной смеси. Улучшение свойств бетонов на портландцементе с использованием ферромагнитного наполнителя достигнуто за счет двухэтапной обработки ЦКИМ, обеспечивающей повышение степени гидратации, приводящее к образованию плотной монолитной структуры цементной матрицы.

**Объектами исследований** являются цементные композиционные инъекционные материалы (ЦКИМ) с ферромагнитным наполнителем из отходов промышленных производств.

**Предмет исследования** – свойства и технология активированных магнитным полем ЦКИМ, определяющие качество инъекционных работ.

**Цель и задачи работы.** Целью исследований является решение научных и практических задач по инъецированию узких вертикальных трещин на контакте поверхностей «бетон-бетон» и «металл-бетон» оптимальными составами ЦКИМ с ферромагнитным наполнителем, подверженных двухэтапной магнитной обработке (сначала воды, а затем систем твердения смесей).

Технология инъецирования ЦКИМ за счет нагнетания составов в дефектные места или в стыки предопределяет двухэтапную магнитную обработку, перспективность которой предполагалась на основе следующих предпосылок рабочей гипотезы:

1. На первом этапе предполагается воздействие постоянного магнитного поля на дисперсионную среду (жидкость затворения), эффективность которой основывается на разработках и результатах, известных из работ отечественных ученых (профессоров Классена В.И., Ерофеева В.Т., Баженова Ю.М., Федосова С.В., Слизневой Т.Е. и других). При этом за счет жидкофазной активации улучшается структура и свойства воды (изменяется смачиваемость твердых поверхностей; ускоряется и усиливается адсорбция и растворения твердых твердых частиц; возрастает агрегация минеральных частиц).

2. На втором этапе воздействие на цементные композиционные инъекционные материалы магнитного поля (по нашему предположению) должно создать в их системах твердения (с ферромагнитным наполнителем) дополнительный потенциал на формируемых поверхностях гидратных кластеров, за счет которого интенсифицируются физико-химические процессы взаимодействия компонентов (что существенно повышает степень гидратации систем твердения в ранние сроки). Это позволит улучшить прочностные, адгезионные, реологические и магнитные свойства ЦКИМ за счет создания более плотной упаковки зерен компонентов смеси



вследствие колебательных движений, совершаемых электрически заряженными частицами с их сольватными оболочками, в результате которых разрушаются случайные непрочные структурные связи в активированных системах твердения и проявляется эффект тиксотропного разжижения.

Для достижения цели были определены следующие **задачи**:

Для достижения поставленной цели были определены и решены следующие **задачи**:

1. Провести анализ отечественных и зарубежных исследований, посвященных опыту заполнения трещин современными инъецируемыми и герметизирующими материалами.
2. Теоретически и экспериментально подтвердить возможность создания эффективных, активированных магнитной обработкой ЦКИМ с ферромагнитным наполнителем из отходов промышленных производств.
3. Разработать оптимальные составы ЦКИМ (с учетом критериев функциональной эффективности и экономичности) с двухэтапной магнитной обработкой и техногенными ферромагнитами.
4. Исследовать прочностные, реологические, магнитные и адгезионные свойства ЦКИМ с двухэтапной магнитной обработкой систем твердения.
5. Определить оптимальные величины индукции магнитного поля и импульса его воздействия как определяющих технологических параметров жидкофазной активации составов ЦКИМ.
6. Предложить технологии инъецирования трещин оптимальными составами ЦКИМ.
7. Определить параметры оценки качества инъекционных работ активированными составами ЦКИМ.
8. Оценить технико-экономическую эффективность применения разработанных ЦКИМ.

***Научная новизна исследования заключается:***

- разработаны теоретические и практические принципы магнитной активации систем твердения, позволяющие получать цементные инъекционные композиции с

низким содержанием поверхностно-активных веществ по сравнению с составами, приготовленными по традиционной технологии (или вообще без их использования) без снижения их функциональной эффективности и строительно-технических свойств специальных растворов за счет существенного снижения пористости систем твердения и повышения плотности контактной зоны с мелким заполнителем и ферромагнитным наполнителем из сталеплавильных шлаков;

- с помощью метода планирования экспериментов оптимизированы параметры двухэтапной магнитной обработки систем твердения, обеспечивающие получение структуры ЦКИМ с улучшенными строительно-техническими свойствами;

- в получении результатов теоретических и экспериментальных исследований, доказывающих эффективное применение ферромагнитных наполнителей из отходов производств в виде тонкомолотых конвертерных шлаков и продуктов обработки металлов абразивными материалами, при изготовлении цементных композиционных инъекционных материалов;

- в обосновании применения двухэтапной магнитной обработкой воды и систем твердения для активации ЦКИМ, с целью повышения их прочностных и улучшения реологических свойств для качественного тампонажа трещин на поверхности раздела «бетон-бетон» в стыках крупнопанельных зданий и «металл-бетон» в бетонных ограждающих конструкциях защитных сооружений специального назначения.

### ***Теоретическая значимость и практическая значимость работы.***

***Теоретическая значимость*** заключается в развитии существующей теории структурообразования и жидкофазной активации систем твердения ЦКИМ как композиционных материалов с оптимальным насыщением цементной и цементно-песчаной матрицы ферромагнитным наполнителем (под воздействием внешнего локального магнитного поля).

***Практическая значимость*** диссертационных исследований заключается:

– в разработке оптимальных составов ЦКИМ, активированных двухэтапной магнитной обработкой воды и водно-цементных систем, для заделки узких и широких трещин в железобетонных конструкциях;

- в определении магнитной проницаемости металлов конструкций входов и вводов инженерных коммуникаций ЗС, а также магнитной восприимчивости составов ЦКИМ, активированных поэтапной магнитной обработкой воды и водно-цементных систем, для заделки трещин в железобетонных конструкциях;
- в установлении граничных параметров внешнего локального магнитного поля и давления нагнетания, активированных поэтапной магнитной обработкой ЦКИМ, в узкие и широкие трещины на контактных поверхностях «металл- бетон» и «бетон-бетон»;
- в разработке метода оценки качества герметизационных работ активированными составами ЦКИМ по степени газопроницаемости;
- в применении результатов теоретических и экспериментальных исследований в решении инженерных проблем, связанных с разработкой и непосредственным применением нормативной и технической документации для организации тампонажных работ оптимальными составами ЦКИМ, активированными двухэтапной магнитной обработкой, для тампонажа трещин этими составами на поверхностях раздела «металл-бетон» и «бетон-бетон» в ограждающих конструкциях ЗС и крупнопанельных зданий.

**Методология и методы исследования:** ориентированность на предысторию постановки и развития проблемы применения ЦКИМ; принципы комплексности и системности поставленных задач; базирование на фундаментальных положениях при раскрытии закономерностей структурообразования систем твердения ЦКИМ, использование как традиционных, так и разработанных – «авторских» методик определения основных свойств и качества работ с использованием предлагаемых материалов, современное техническое сопровождение эксперимента (прикладная и практическая нацеленность результатов работы).

***Положения, выносимые на защиту:***

- теоретическое и экспериментальное обоснование механизма упрочнения ЦКИМ в процессе насыщения его цементной матрицы ферромагнитным наполнителем из промышленных отходов;

- оптимальные составы, обладающие улучшенными прочностными, реологическими и другими свойствами ЦКИМ, активированные двухэтапной магнитной обработкой, с ферромагнитным наполнителем из отходов металлургической промышленности (тонкодисперсные конвертерные шлаки и материалы, полученные в результате обточки металла электрокорундом);

- технология цементации дефектных мест в бетонных защитных сооружениях на поверхностях контакта металл-бетон и в вертикальных стыках крупнопанельных зданий и сооружений на поверхностях контакта бетон-бетон составами ЦКИМ, активированными двухэтапной магнитной обработкой;

- установленные значения степени магнитной проницаемости металлов значительной толщины (0,6 - 1,0 см) и магнитной восприимчивости составов ЦКИМ, активированных двухэтапной магнитной обработкой, с ферромагнитным наполнителем из отходов производств (тонкомолотый конвертерный шлак и продукты обточки стали на электрокорунде);

- результаты оценки воздухопроницаемости составов ЦКИМ, активированных двухэтапной магнитной обработкой, наполненными ферромагнетиками из конвертерных шлаков и продуктов обточки стали на электрокорунде).

***Достоверность полученных результатов и обоснованность*** результатов и выводов диссертационной работы **подтверждены:**

- обоснованной постановкой научных проблем, принятых допущений и ограничений, большим объемом выполненных экспериментальных исследований;

- хорошей сходимостью результатов модельных исследований и реализованного эксперимента со статистической обработкой результатов;

- внедрением активированных составов ЦКИМ в технологию инъектирования при герметизации трещин указанными составами на объектах дорожного, промышленного и гражданского строительства.

***Апробация результатов работы.*** Основные результаты диссертационных исследований были представлены на следующих международных научно-практических конференциях: «Наукоемкие технологии и инновации», Белгород, 2014 (Юбилейная конференция, посвященная 60-летию БГТУ им. В.Г. Шухова); «Современная

металлургия нового тысячелетия» (Липецк, 2015-2017 гг.); «Инновационные технологии в науке и образовании» (Чебоксары, 2015), на ежегодных научно-практических конференциях ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» (2013-2017 гг.) и других.

***Внедрение результатов исследований:***

1. Разработанные составы цементных инъекционных композиций для заделки трещин на основе отходов металлургии были внедрены при проектировании дорожной одежды по улице Московская в г. Липецке в ООО «ЛипецкНИЦстройпроект» (Приложение А); в ООО «Промизделия» – при строительстве склада готовой продукции в селе Косыревка (Липецкая область) (Приложение Б); при строительстве и реконструкции тринадцатизэтажных 124-квартирных домов из монолитного железобетона по улице Свиридова в г. Липецке – в ООО «Хай-Тек» (Приложение В).

2. Основные положения диссертации, результаты эксперимента и промышленной апробации используются в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлению 08.03.01 – Строительство профиля подготовки «Производство и применения строительных материалов, изделий и конструкций» и «Автомобильные дороги» (Приложение Г).

***Публикации.*** Результаты исследований, отражающие основные положения диссертационной работы, изложены в 15 научных публикациях, в том числе 4 статьи в российских рецензируемых научных изданиях, рекомендованных Перечнем ВАК Минобрнауки России, 1 статья в издании, входящем в международную реферативную базу данных и систем цитирования SCOPUS, в одной монографии; получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

***Объем и структура работы.*** Диссертационная работа состоит из введения, основной части (пяти глав), заключения, списка литературы и четырех приложений. Работа изложена на 169 страницах машинописного текста, включающего 31 таблицу, 48 рисунков, а также список литературы из 204 наименований.

## **ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

### **1 АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ. ПРОБЛЕМЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ ЗАПОЛНЕНИИ ТОНКИХ ТРЕЩИН (В НАРУЖНОМ КОНТУРЕ ГЕРМЕТИЗАЦИИ ЗАЩИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ И В ЖИЛИЩНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ)**

#### **1.1 Проблемы заделки трещин в наружных железобетонных ограждающих конструкциях защитных сооружений.**

##### **Анализ инъекционных материалов, использующихся при этом**

В промышленном и гражданском строительстве, а также в специальном строительстве в ограждающих конструкциях защитных сооружений от некачественного производства работ, температурных воздействий и в результате усадочных объемных деформаций в стыках между сборными конструкциями, а также на контактных поверхностях с металлическими деталями вводов инженерных коммуникаций в бетоне могут возникнуть дефекты в виде трещин, раковин и пустот. Это особенно опасно в железобетонных ограждающих конструкциях защитных сооружений, так как указанные дефектные места становятся путями затекания в них загрязненной химическими и радиоактивными веществами воздушной среды. В других случаях дефекты нарушают целостность конструкций, в результате чего снижается работоспособность и эксплуатационная надежность сооружений в целом.

Перечисленные дефектные места, обладающие недостаточной герметичностью, можно заделывать путем нагнетания в них различных герметизирующих смесей (под различным давлением и в его отсутствии). При этом различают следующие три вида инъекционных работ: силикатизацию, при которых в трещины по очереди нагнетают раствор натриевого жидкого стекла и хлористого кальция; смолизацию, когда полости и пустоты заполняют карбамидными или эпоксидными смолами, в составах которых находится отвердитель и цементацию – процесс, если

в герметизирующем растворе в качестве основного вяжущего используют цементно-песчаные и водоцементные смеси [142, 24].

Силикатизация для заделки трещин в бетоне на контакте с металлом применять нельзя, так как жидкое стекло и хлористый кальций, основные материалы данного вида инъекционных работ, провоцируют коррозию металла.

Смолизация, как метод заделки трещин в железобетонных конструкциях защитных сооружений также является неэффективным, так как эти конструкции предназначены не только для восприятия значительных динамических конструкций, но и высоких температур (например, при ядерном взрыве). А материалы, используемые для смолизации (эпоксидная смола и некоторые другие) не выдерживают воздействий высоких температур. Кроме того, в массовом (материалоемком) строительстве, использование полимерных смол в качестве компонентов систем твердения, является экономически неоправданным.

Таким образом, цементация является основным видом заполнения дефектных мест в железобетонных ограждающих конструкциях защитных сооружений, в том числе и на контакте металл-бетон.

Но при использовании такого вида работ очевидны возникающие проблемы. Для их эффективного обсуждения рассмотрим физическую картину инъекционной заделки трещин цементными инъекционными составами.

Нагнетаемая в неплотности и дефекты цементная герметизирующая смесь в виде цемента, воды с тонкодисперсным наполнителем, движется в них с небольшой скоростью под небольшим давлением, заполняя на своем пути трещины и пустоты и вытесняя при этом оттуда воду или воздух. Чем более протяженные трещины, тем меньше в них скорость течения инъекционных смесей и тем быстрее в них оседает водоцементная смесь. Осевший осадок не остается в покое, так как продолжающееся нагнетание смесей размывает его, вследствие чего граница отложения инжецируемых смесей отодвигается. Таким образом, определенный объем материала захватывается нагнетаемым раствором и перемещается вглубь трещины, но определенная его масса остается на месте и отверждается. В процессе схватывания и

увеличения объема нагнетаемого цементного раствора постепенно уменьшается ширина трещины, но, чаще всего, полностью заполнить всю трещину не удастся.

Некоторые из авторов, исследовавших механизмы совместной работы арматуры с цементными композиционными инъекционными материалами (ЦКИМ), утверждают, что прочность цементного раствора, инъецируемого в трещины и пустоты ограждающих конструкций ЗС, не может быть меньше 28 МПа в возрасте двадцати восьми суток твердения [142, 24, 29]. Именно такие материалы, обладающие достаточной прочностью, обеспечивают необходимую герметичность отремонтированных мест ограждающих конструкций защитных сооружений после инъекционной заделки трещин ЦКИМ. Однако очень трудно обеспечить необходимую прочность у тампонажных материалов, смеси которых имеют высокое содержание воды. А именно такими тампонажными смесями с В/Ц= 0,8-1,0 и более заделывают узкие трещины с шириной раскрытия менее 0,5 мм [29].

При этом существенным недостатком нагнетания цементных инъекционных растворов в случае заполнения неплотностей контакта металл-бетон в бетонных конструкциях ЗС является большой расход инъекционных материалов и, главное, не полное заполнение дефектов (при малой надежности уплотнения контакта металл-бетон).

Это объясняется тем, что при традиционных способах инъектирования огромный объем цементного материала вынужденно (под давлением нагнетания) заполняют толщу бетонных конструкций, проникая в существующие дефекты - трещины, пустоты и поры. В защитных сооружениях с вертикальными трещинами ситуация осложняется еще и тем, что после снятия давления нагнетания из-за действия силы тяжести инъекционный раствор вытекает из трещин.

Таким образом, из вышеприведенного анализа научных источников следует вывод о том, что при существующем способе оперативного восстановления неплотностей раздела поверхностей контакта металл-бетон в конструкциях ЗС специального строительства, а также при ремонте железобетонных конструкций зданий и сооружений промышленного и гражданского строительства традиционные цементные инъекционные материалы не обеспечивают требуемую герметичность



для обеспечения условий водо- и воздухопроницаемости. Для инъекционного уплотнения дефектных мест контакта бетон-бетон и металл-бетон необходимы инновационные технологии и материалы, способные эффективно работать в данных условиях.

## **1.2 Активация цементных систем твердения как фактор управления синтезом композитов с заранее заданными свойствами**

В настоящее время в строительстве возрастает потребность в качественных композитах различного функционального назначения. В связи с этим достаточно часто используется мелкозернистый раствор (микробетон). За счет отсутствия крупного заполнителя он отличается хорошей удобоукладываемостью и однородностью. При этом постоянно формулируются задачи по совершенствованию его функциональных свойств и технологических параметров. В связи с этим конструирование составов и структур инновационных мелкозернистых бетонов, обладающих высокими прочностными и другими свойствами за счет применения новых методов активации, можно считать крайне актуальной задачей.

Под активацией вещества можно рассматривать технологические методы, при которых высвобождается дополнительная энергия, получаемая элементарными частицами этого вещества [23]. Эта потенциальная энергия накапливается в активных центрах, которые представляют собой дискретные напряженные части активируемого вещества, не способные выделять дополнительную энергию без какого-либо внешнего воздействия. Под внешним воздействием можно рассматривать удар с неактивированными элементарными частицами, с активными центрами этого же вещества или внешнее физическое поле. Эти изменения заставляют материал переходить в метастабильное состояние, характеризующиеся энергией, количественно отличающейся от термодинамически равновесного состояния, за счет чего свободная энергия накапливается внутри материи.

В связи с этим необходимо говорить об эффективности жидкофазной активации строительных композитов, так как такое регулирование свойств (с помощью магнитной, механической и других видов обработки жидкости затворения) по сравнению с твердофазной активацией (за счет механической обработки вяжущих и инертных компонентов, а также введением химических добавок) обеспечивает улучшение механических свойств раствора без перерасхода пластифицирующих добавок и цемента. При этом до сих пор практически отсутствуют теоретические положения, описывающие механизмы воздействия активации жидких компонентов материалов на характеристики мелкозернистых цементных материалов, не отработаны оптимальные составы, а также технология обработки внешними физическими полями и производство таких композитов. Цементные вяжущие в настоящее время все также востребованы современным строительством, как и прежде. При этом темпы развития стройиндустрии и капитального строительства диктуют новые качественные характеристики таких изделий, основывающиеся на экономической и функциональной эффективности, а также на применении техногенного сырья в технологическом цикле. Основные свойства цементных композитов формируются за счет состава компонентов, приемов конструирования структуры, а также технологических приемов. Такие свойства как удобоукладываемость, пластичность, прочность при сжатии и при изгибе, водопроницаемость, морозостойкость определяют область применения разработанных строительных материалов. При этом строительные растворы, в том числе специального назначения, характеризуются плотной почти бездефектной структурой, по сравнению с крупнозернистыми материалами отличаются повышенным расходом вяжущего вещества, поэтому требуют корректного расчета состава. Именно свойства систем твердения определяют свойства композита в целом, а характеристики инертных компонентов отставлены на второй план.

Известно, что механизмы твердения систем на основе цементных вяжущих основываются на постоянном переходе коагуляционных структур систем типа «цемент – вода» в конденсационную, с превращением в кристаллизационную структуру [187, 120]. Поэтому воздействовать с помощью химических, физических или

структурных факторов прежде всего нужно на первичную гидратацию цементных систем твердения, влияющих на перекристаллизацию первичных продуктов. Таким образом, при выборе метода управления (воздействия) структурообразованием, а, следовательно, и свойствами, в первую очередь необходимо учитывать взаимодействие в системах твердения типа «цемент – вода» на начальных сроках.

Направление активации цементных композитов, связанное с внешними воздействиями на системы твердения, связано с технологическими изменениями (либо введением нового технологического передела,

Давно известно, что за счет введения в состав суперпластификаторов (СП), в частности С-3, можно «снизить трудозатраты при укладке бетона на 10–60%, повысить прочность бетона на 30–70%, снизить водонепроницаемость в 2–3 раза, сократить расход цемента на 15–20%. При этом обеспечивается повышение морозостойкости, общей коррозионной стойкости бетона и качества изделий» [77]. Поэтому такие химические добавки завоевали более семидесяти пяти процентов строительного рынка.

Химическая формула суперпластификатора С-3 состоит из полимеров, олигомеров, сульфат натрия и соль нафталинсульфокислоты. Нафталиновые ядра через метиленовые мостики соединены с функциональными сульфогруппами.

При применении суперпластификаторов (их дозировка составляет от 0,6 до 0,9 процентов от массы цемента) в бетонную смесь практически не вовлекается воздух, что на выходе формирует плотную структуру. За счет дезагрегирующей способности и увеличения активной поверхности повышается скорость гидратации цементных систем твердения. Сохраняемость свойств, в том числе подвижности, характеризуется достаточно стойким эффектом: в течение двух часов.

В сложных дисперсных системах твердения типа «цемент – вода» на поверхности зерен цемента развивается одномоментно сразу несколько механизмов взаимодействия, которые развиваются за счет электростатических - адгезии, когезии, электрокоагуляции, адсорбции. При этом возможно проявление стерического эффекта [14, 12, 2] и штерновского потенциала, который перезаряжает двойной элек-

трический слой в изо-электрической точке. В работе [160] показано, что «для улучшения контакта между микрочастицами цементно-водной системы необходимо применять технологические воздействия на поверхность раздела фаз различными способами, которые можно разделить на три группы: повышение вероятности межфазных контактов за счет перемешивания или вибрации смеси; изменение свойств самих поверхностей за счет химической модификации или за счет активации; увеличение удельной поверхности клинкерных минералов и (или) заполнителей за счет более тонкого помола».

С целью снижения расхода химических добавок можно применять как твердофазную, так и жидкофазную активацию. За счет диспергирования компонентов при механической активации наблюдается изменение строительно-технических свойств как из-за увеличения удельной поверхности зерен цемента, так и из-за перевода поверхности в аморфное состояние.

Все еще наименее изученным направлением является активация жидкости затворения с целью целенаправленного изменения свойств цементных систем. Сегодня мы имеем дело только с начальной стадией экспериментов применения жидкофазной активации посредством воздействия на воду.

Для объяснения механизмов структурообразования цементных систем твердения на ранних сроках необходимо выделить [160]: водородную связь, поляризацию и структурирование воды, находящейся между частицами твердой фазы, при которой водные кластеры стабилизируются вблизи твердой поверхности, становясь структурно более упорядоченными. Структурная упорядоченность воды в приповерхностном слое определяет изменение ее свойств: вязкости, упругости, диэлектрической проницаемости. Действие молекулярных сил и активных центров поверхности в коллоидных системах способствует изменению структуры и механических свойств прилегающих слоев жидкости по сравнению с ее объемными свойствами. Эти изменения передаются в объем жидкой фазы по эстафетному механизму.

Многие авторы [121] рассматривают воду инициатором механизмов гидратации. Растворение зерен цемента возможно благодаря протонированию поверхностных слоев дисперсной фазы за счет аномально высокой подвижности и высокой проникающей способности протонов (ионов водорода), образующихся при электролитическом разложении молекул воды при первичном контакте с частицами цемента. Протоны, размер которых на несколько порядков меньше размеров элементарных ячеек кристаллической решетки клинкерных минералов, проникают в кристаллическую решетку минералов, связываются прочной водородной связью с электроотрицательными атомами кислорода и образуют гидроксил-ионы. Протоны также вступают в реакции ионного обмена с катионами минералов ( $Ca^{2+} \leftrightarrow 2H^+$ ), обеспечивая выход ионов кальция в раствор, которые соединяются с гидроксил-ионами и образуют первичные молекулы  $Ca(OH)_2$ , сопоставимые по размерам с кристаллической решеткой основных минералов. В результате происходит расклинивающее разрушение поверхностного слоя частиц цемента с образованием нанодисперсных гидратированных частиц.

Таким образом, вода является инициатором химических реакций, происходящих при гидратации цементного клинкера, и от ее состояния зависит кинетика этих реакций.

К настоящему моменту накоплен достаточный положительный опыт воздействия на воду затворения внешними полями различной природы: физическими, магнитными, акустическими, электрическими.

В работе [115] предложено разделить способы активации воды затворения на три класса: механические, химические и комбинированные.

Магнитная обработка подразумевает движение воды в постоянном или переменном магнитном поле [152, 70]. По утверждению многих авторов [16, 168], предварительная магнитная обработка воды затворения в многолетней практике приводит к статистически достоверному повышению прочности цементного камня и бетона.

Таким образом, для направленного изменения физико-механических свойств бетонов наиболее перспективным является жидкофазная активация с помощью

магнитного и гидромеханического воздействия для получения наноструктурированных жидкостей, используемых при затворении бетонов.

Дисперсионная среда, на которую воздействует внешнее энергетическое поле, резко меняет свои свойства [117]. Под внешними полями, которые накладываются на жидкость затворения, можно понимать механические, акустические, электромагнитные и другие.

Известно, что почти все исследователи констатировали при прохождении жидкости магнитного поля, ускорялась коагуляция и слипание тонкодисперсных зерен цемента. Кроме того, по мнению [160] к изменениям, наблюдавшимся у природной воды, движущейся в магнитном поле, можно отнести «изменения смачиваемости твердых поверхностей; ускорение и усиление адсорбции; ускорение растворения твердых тел; изменение концентрации растворенных газов; возрастание слипания минеральных частиц в 2-4 раза».

Несмотря на то, что на практике воду, подвергнутую магнитной обработке, в качестве жидкости затворения цементных систем применяли еще в прошлом веке [182], единой теории, объясняющей механизм воздействия магнитного поля на воду, пока не существует.

В.И. Классен [102] пытался разделить существующие объяснения на 3 группы:

- магнитное поле воздействует на собственно воду;
- магнитное поле воздействует на присутствующие в воде ионы;
- магнитное поле воздействует на ферро- и парамагнитные частицы, присутствующие в воде в большинстве случаев.

При наложении электромагнитного поля на дисперсную систему действуют следующие силы [59]:

1) Сила Лоренца  $F_{\text{max}} = q(E + V \times B)$ , где  $q$  – заряд частицы;  $E$  – напряженность электрического поля;  $B$  – величина магнитной индукции;  $V$  – скорость движения частицы;

2) Сила, обусловленная градиентом магнитного поля  $F_g = -\chi / (2 \text{grad } B^2)$ , где  $\chi$  – магнитная восприимчивость вещества;

3) Момент сил, проявляющийся в однородном магнитном поле для частиц, имеющих собственный магнитный момент  $M_v$ : .

Таким образом, даже слабые магнитные поля способны усиливать взаимодействия между коллоидными частицами, в большом количестве образующимися в системе «цемент – вода» после затворения. Вода является средой, транслирующей колебания возникающих центров нуклеации, способствует образованию кристаллогидратов определенного состава. С помощью внешнего магнитного поля можно воздействовать на структуру водородных связей, а, следовательно, и сигналы, поступающие от наноразмерных частиц твердой фазы, и тем самым управлять процессами кристаллизации в цементной матрице.

### **1.3 Анализ возможности использования тонкодисперсного конвертерного шлака в качестве наполнителя для ЦКИМ**

Многочисленными теоретическими и экспериментальными исследованиями доказано, что прочностные и технологические свойства цементных растворов и бетонов можно улучшать введением в матрицу разнообразных тонкодисперсных наполнителей [151, 195, 110, 57, 7, 62, 90, 91, 42, 109, 6, 162]. В качестве таких наполнителей используют известковую и силикатную пыль, зольные материалы и некоторые отходы металлургического производства, в частности, тонкодисперсный шлак.

Оценка возможности применения шлака в составах ЦКИМ обоснована результатами пилотных исследований техногенных продуктов металлургического производства ПАО «НЛМК», проведенных специалистами кафедры «Строительное материаловедение и дорожные технологии» Липецкого государственного технического университета и ряда кафедр других высших учебных заведений [6, 162, 156, 111, 163, 165, 166, 192 –194, 113, 196]. До сих пор в российском металлургическом комплексе в промышленных отвалах находится около пятисот миллионов тонн шлаков с содержанием в них более пятнадцати миллионов тонн металла (в виде включений). Площадь отвалов (десятки тысяч гектаров) ежегодно увеличивается более чем на 100 гектаров. В таблице 1.1 приведены результаты

обследования шлаковых отвалов ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат» (ПАО «НЛМК»).

Таблица 1.1 – Отходы металлургического производства ПАО «НЛМК» [57]

№	Наименование отходов	Объем, млн тонн
1	Доменные шлаки	3,85
2	Металлургические ковшевые остатки	0,60
3	Графитсодержащие отходы	0,74
4	Шлаки ферросплавов	0,36
5	Сгоревшая желобная и ленточная масса	1,52
6	Закозленная футеровка чугуновозных ковшей	0,05
7	Технологический мусор	0,64
8	Шлаки из электропечей фасонносталелитейных цехов	0,20

На металлургических производствах ПАО «НЛМК» образуется большой объем вторичных продуктов в виде шлаков, продуктов шлаковой переработки, горелой (формовочной) земли, различной пыли - аспирационной и колошниковой, разнообразных шламов. Известно, что строительно-технические свойства шлаковых материалов зависят от металлургического производства [151, 195, 110, 57, 7, 62, 90, 91, 42, 109, 6, 162].

На ПАО «НЛМК» существуют следующие способы производства готовой продукции: доменный процесс, предусматривающий выплавку чугуна и сталеплавильный процесс - выплавка стали из чугуна. По этим технологиям образуются шлаки, в первом случае - доменные, во втором – сталеплавильные. Вид структуры, гранулометрия, плотность и другие строительно-технические и технологические свойства шлаков формируются на основе минералогического состава, способа производства и скорости охлаждения шлакового расплава.

В случае послойного охлаждения в естественных условиях образуется плотная кристаллическая структура, при быстром охлаждении – водой или холодным воздухом – аморфная витрофировая структура. Шлаки могут быть текущего выхода и содержаться в отвалах. Больше проблем с использованием отвальных шлаков. Они накапливаются в результате слива расплава шлака в отвал. Этот материал представляет со-



бой кусковой материал с крупностью зерен и кусков от пяти и менее до ста миллиметров. Он содержит различные примеси, а также продукты распада в виде тонкодисперсных зерен. Несомненно, по объему и значимости для строительной индустрии доменные шлаки играют ведущую роль. В меньших количествах образуются сталеплавильные шлаки (мартеновские, электросталеплавильные и конвертерные).

В свою очередь, при выплавке черных металлов образуются ферросплавные шлаки, свойства которых зависят от элементов, добавляемых к железу. В качестве таких добавок используют феррохром, ферросилиций, ферротитан и другие.

Однако, из многочисленных видов шлаков и других отходов металлургического производства по своим свойствам в качестве ферромагнитного наполнителя целесообразнее всего использовать тонкодисперсные конвертерные шлаки.

Для доказательства данного утверждения можно привести следующие факты: среди шлаковых отходов металлургического производства большую часть составляет шлак с зернами фракций от нуля до десяти миллиметров; дробимость зерен составляет 18 % и его, без существенных затрат можно измельчать до получения значительной удельной поверхности (до 300 м<sup>2</sup>/кг и более). А главное, в составе конвертерных шлаков содержится большое количество металлического железа гематита и магнетита - до 20 %, в результате чего он действительно может быть использован в качестве ферромагнитного наполнителя матриц цементных тампонажных композиционных материалов.

#### **1.4 Оценка целесообразности применения в качестве наполнителя ЦКИМ продуктов обточки стали абразивным инструментом**

На многочисленных предприятиях машиностроения заточка инструмента, шлифование стальных и других металлических изделий производится абразивными материалами [163, 165, 166, 192 –194, 113, 196-198, 183, 199]. Целесообразность использования абразивных материалов для обработки металлов определяется степенью твер-

дости по шкале Мооса (таблица 1.4). Эти материалы могут быть природные и искусственные. Произведем оценку основных свойств абразивных материалов по известному каталогу [199].

К природным абразивным материалам относятся: глинозем, кремнезем, дробленый кварц, недробленый песок, различные силикаты, наждак и все разновидности углерода (графит, алмаз и др.). Природные абразивные материалы достаточно широко используются в металлообрабатывающей промышленности, но чаще всего шлифовальные и заточные изделия и изготавливаются из искусственных абразивных материалов.

Таблица 1.2 – Твердость материалов по шкале Мооса [199]

Материал	Твердость по Моосу	Материал	Твердость по Моосу
1	2	3	4
Жидкость	0	Лезвие ножа	5,5
Тальк	1	Ортоклаз	6
Между тальком и гипсом	1,5	Пирит	6,5
Гипс	2	Кварц	7
Человеческий ноготь	2,5	Гранат	7,5
Кальцит	3	Топаз	8
Медная монета	3,5	Кризоберил	8,5
Флюорит	4	Корунд	9
Между флюоритом и апатитом	4,5	Кремень	9,5
Апатит	5	Алмаз	10

Искусственные абразивные материалы изготавливают из природных минералов, обогащенных или необогащенных руд и их измельченных смесей методом плавления в печах с последующим охлаждением и дроблением.

Сырьем для производства искусственных абразивов служат руды и минералы, содержащие большое количество твердых кристаллов в виде окислов кварца ( $SiO_2$ ) и алюминия ( $Al_2O_3$ ).

Основным природным источником оксида алюминия являются бокситовые глины. Они характеризуются большим содержанием корунда или  $Al_2O_3$  (не менее

60 %). Температура плавления бокситов превышает  $1400^{\circ}\text{C}$  и процесс изготовления корунда связан с использованием значительного количества электрической энергии. Именно поэтому этот материал получил название электрокорунд. Различают несколько видов электрокорунда: нормальный, белый, хром-титанистый и другие.

Также в промышленности широко используют следующие техногенные абразивные материалы: черный и зеленый корунды, получаемые при высокой температуре в результате расплава кремнезема с другими сырьевыми компонентами - коксом, золами и другими материалами.

Известно, что технологически при заточке металлических инструментов или шлифовании изделий техногенная масса формируется из тонкодисперсных металлических частиц - поэтому их широко используют в качестве наполнителей в производстве различных строительных материалов.

Учитывая, что отдельные виды отходов обработки металлов имеют высокую твердость и значительную удельную поверхность ( $150 \text{ м}^2/\text{кг}$ ), есть все основания исследовать целесообразность их применения в виде ферромагнитного наполнителя для ЦКИМ.

### **1.5 Теоретические представления о структурообразовании цементных композиционных инъекционных материалов (ЦКИМ)**

Механизмы структурообразования цементных композиционных инъекционных материалов (ЦКИМ) определяют на современном этапе применение высокодисперсных компонентов, увеличивая тем самым количественно площадь поверхности раздела фаз, увеличение плотности, наличие мелкокристаллических новообразований в матрице. Это объясняется предъявляемыми к таким материалам строительно-техническим и функциональным требованиям. При этом ЦКИМ должны обладать улучшенными основными свойствами, как в технологическом процессе, так и в эксплуатационных условиях. При этом решается довольно сложная задача – получение прочного строительного композита с высоким водо-вяжущим отношением с быстросхватывающейся матрицей. Таким образом, структура

ЦКИМ – это результат управления сложными механохимическими и физико-химическими явлениями, происходящими на стадии изготовления материала. При этом очевидно, что для повышения плотности цементных композиционных инъекционных материалов при высоком водоцементном отношении недостаточно сформировать абсолютно плотную упаковку зерен (на уровне микробетона). Наполнение композиционного материала эффективными тонкодисперсными добавками как раз и позволяет существенно повысить прочность системы в целом. Этой же цели будет служить уменьшение порового пространства в композите. В нашем случае это возможно только за счет воздействия магнитного поля на системы твердения ЦКИМ. Кроме того, необходимо выявить оптимальное количество кристаллических и аморфных новообразований на нано-структурном уровне. Рассмотрим заявленные подходы более подробно.

Во-первых, ЦКИМ необходимо рассматривать с позиций базовой теории структурообразования цементных композитов. Под композитом понимается материал, в структуру которого включены разнородные элементы, не смешивающиеся друг с другом. При этом они обладают синергетическими свойствами, отсутствующими в отдельных компонентах. Структура композита формируется целенаправленно на основе известных закономерностей и законов [69].

Структура ЦКИМ должна конструироваться исходя закономерностей, сформулированных в структурной теории. В этом случае возможно получение композитов с заранее заданными свойствами, зависящими от параметров формируемой структуры.

Структура цементных композиционных материалов может быть рассмотрена на разных уровнях - от атомно-молекулярного до макроструктуры, на котором рассматриваемый материал состоит из матрицы (цементного камня или цементно-песчаного раствора), ферромагнитного наполнителя и контактной зоны. Эти структурные уровни характеризуются конкретными физическими характеристиками. Многокомпонентность цементных смесей и особенности ферромагнитных наполнителей, являющихся отходами металлургических производств, диктуют необходимость рассмотрения ЦКИМ, разделяя их по структурным уровням.

Из общих признаков структуры ЦКИМ особенно необходимо выделить - многофазность, полидисперсность, полиструктурность и другие [69]. Структурные характеристики непосредственно зависят от составов инъекционных смесей, применения двухэтапной магнитной обработки систем твердения, параметров нагнетания, особенностей нарастания прочности в процессе заполнения пустот в бетоне. Расчет таких характеристик может быть осуществлен на основе известных подходов и формул, но при этом необходимо понимать степень сходимости результатов.

Решение технических задач синтеза цементных композиционных материалов основывалось на двух теориях - теории полиструктурности строения композиционных строительных материалов – КСМ [162] (автор - Соломатов В.И.) и теории искусственных строительных конгломератов – ИСК [156] (автор - Рыбьев И.А.).

Первая теория дает представление о структурообразовании, технологии и строительно-технических свойствах полиструктурных композиционных строительных материалов. Принимая полиструктурность строения как аксиому, можно целенаправленно формировать структуру композита, а значит синтезировать материалы с заранее известными свойствами и разрабатывать максимально эффективную технологию.

Одним из главных положений полиструктурной теории является необходимость реализации принципа раздельности, согласно которому структурообразование композиционных материалов на разных масштабных уровнях должно реализовываться по раздельным технологиям. На сегодняшний день, очевидно, эта теория наиболее актуальна, даже в сравнении с положениями теории ИСК И.А. Рыбьева. Из этого следует, что ЦКИМ, являясь композитом, имеет признаки конгломератности строения. Эта проблема – однородности – неоднородности строения также является актуальной. Поэтому цементные инъекционные материалы можно считать искусственными строительными композитами с конгломератным типом структуры.

При оптимизации составов ЦКИМ необходимо учитывать следующие группы факторов, непосредственно влияющих на структуру: структурообразующие, структурохарактеризующие и структуроформирующие [113, 197, 183].

Такие факторы, как количество цемента, удельная поверхность вяжущего и наполнителей, отношение исходных материалов, изменение водоцементного отношения, можно отнести к группе структурообразующих факторов. Изменения технологических параметров, количество и состав основных и вспомогательных операций, механизмы и оборудование, использующееся при смешивании и уплотнении, увеличение пластичности смеси (без удорожания стоимости), условия набора прочности и другие можно рассматривать в качестве структуроформирующих факторов.

Структурохарактеризующие факторы непосредственно зависят от строительно-технических свойств исходных компонентов – степень гидратации и активность цементных вяжущих, гранулометрия, прочность и деформативные свойства мелкого заполнителя и ферромагнитного наполнителя, которые в результате непосредственно формируют характеристики готового композита.

Доказано, что механизм структурообразования ЦКИМ является сложным процессом. Начинать его рассмотрение необходимо с процессов гидратации и гидролиза вяжущих веществ (в нашем случае – цементных дисперсных систем твердения ЦКИМ). На современном этапе развития строительного материаловедения очевидно, что схватывание и твердение систем твердения цементных материалов происходит в результате образования структуры, в основном состоящей из гидратов.

Еще в 1887 году Ле Шателье достаточно глубоко изучал строение неорганических вяжущих веществ, а также проявление их свойств после взаимодействия с водой. В двадцатом веке существовали сразу две теории, объясняющие твердение вяжущих – теория А. Ле Шателье и теория В. Михаэлиса. Их объединяет представление о растворении вяжущего вещества в жидкости, при котором образуется насыщенный раствор. По мнению А. Ле Шателье, раствор со временем пересыщается относительно образующихся гидратов, которые затем выделяются в виде кристаллов. Эти новообразования, взаимодействуя между собой, и формируют структуру композита. По теории В. Михаэлиса, эти процессы сопровождаются гелеобразованием. Со временем эти теории объединились (благодаря усилиям А.А. Байкова), показав более системный взгляд на механизмы схватывания и твердения вяжущих.

Он показал, что структурообразование является сложным кристаллохимическим процессом, проходящим несколько этапов: растворение цемента, прохождение топохимических реакций с образованием коллоидов и кристаллизация [62]. Это было подтверждено научно: кристаллические новообразования имеют размерность коллоидов.

Следующим этапом формирования новых знаний о твердении за счет гидратационной активности вяжущих стала физико-химическая механика, основанная как наука П.А. Ребиндером [199], в основу которой был заложен принцип структурообразования. Под структурой понимали систему строительно-технических свойств, за счет которой материал приобретал способность сопротивляться действию внешних агрессивных факторов. В этом аспекте структура может быть охарактеризована с помощью трех уровней. Во-первых, структура может быть отнесена к веществу, обладающему химическим и фазовым составом. Во-вторых, категория структуры соотносится с системой, в том числе с совокупностью пор, и существует в системе геометрических координат. И, в-третьих, рассматривается структура связей, управляющая как веществом, так и поровым пространством [91].

В традиционном цементном клинкере содержится около восьмидесяти процентов силикатов кальция, которые в результате реакций с водой, образуют гидросиликаты кальция (ГСК). ГСК в свою очередь связывают между собой элементы структуры, именно они придают прочность цементным композиционным материалам.

Гидратация цемента предполагает наличие нескольких стадий – смачивание, адсорбция, растворение, диффузия, химическая реакция зародышеобразования и образования гидратов, формирование структуры с конкретными физико-механическими свойствами. Твердение минеральных вяжущих обычно сопровождается деструктивными явлениями, объясняющимися дефектами контактов срастания.

Таким образом, в основе механизма твердения цемента лежат гидролиз и гидратация, в результате которых образуются вещества, за счет которых и происходит последующее структурообразование. Развивающаяся диффузия между частицей цемента и ее сольватной оболочкой, приводит к появлению гелеобразных веществ,

с которыми со временем также происходят структурные изменения. Дальнейшее взаимодействие дисперсной фазы и дисперсионной среды приводит к накоплению продуктов реакции, за счет чего вся система твердения упрочняется.

Результаты исследований многих авторов подтверждают, что структурообразование в твердеющей системе протекает только при достижении граничных условий. Эти условия не унифицированы: по мнению А. Ле Шателье [199, 68, 149], к такому условию можно отнести степень пересыщения цементного раствора. А. Ф. Полак и В. Б. Ратинов [199, 68, 149] в качестве такого критерия рассматривают порог коагуляции. М.М. Сычев [177], называет это «условиями стеснения».

Анализ литературных источников показал, что научные труды, посвященные механизмам проявления свойств вяжущими гидратационного твердения, могут быть сгруппированы по двум направлениям. Первое – это выявление возможных реакций гидратации и гидролиза цементов. Второе – выявляющие закономерности проявления гидратационной активности с продуктами гидратации и гидролиза, то есть с ГСК. При этом, в таких зависимостях учитывается и кристаллохимическая природа гидросиликатов кальция.

Раскрыть именно химический аспект проблемы структурообразования систем твердения на основе цементных вяжущих удалось В.А. Кинду и В.Ф. Журавлеву [68], которые достоверно раскрыли вопросы проявления гидравлических свойств. Эти исследования продолжили С.Д. Огороков и С.Л. Вольфсон [197, 199]. Они предложили использовать метод аналогии: проявление активности можно предположить минералам, которые входят в состав клинкерных. В то же время В.Ф. Журавлеву удалось доказать, что гидравлической активностью, или способностью связывать, обладают и другие соединения элементов 2-ой группы периодической системы Д.И. Менделеева. Определяющими факторами при этом признаны кристаллохимические, а также структура этих веществ. При этом представление о том, что существует ограничение: количественно эффективный радиус силикатов и алюминатов 2-ой группы должен быть больше  $1,03 \text{ \AA}$ , впоследствии не было доказано.

Кроме того, интересны труды Брандерберга [149], который считал, что гидравлическая активность напрямую зависит от структурных факторов, в частности,



это связано с низкой координацией активных катионов. К такому же выводу пришел и Джеффери, который полагал, что еще одним фактором при проявлении вяжущих свойств является нерегулярность координации в возможности оксида взаимодействовать с жидкостью затворения. Последующие работы (в том числе О.П. Мчедлова-Петросяна [149]) показали вероятность прохождения реакции гидратации между вяжущим и дисперсионной фазой, зависящей от способности новообразований аккумулировать пересыщение, которое характеризуется приростом в средней энергии связи Ca-O, Mg-O и так далее.

Системы твердения, состоящие из тонкодисперсных зерен цемента и активного наполнителя, проявляют гидравлические свойства в том случае, если вода затворения (растворитель) обладает свойством полярности, а новообразования (ГСК) содержат аквакомплексы, сольваток комплексы или другие функциональные полярные группы. Для улучшения адгезионных свойств цементных матриц необходимо управлять составом образующихся гидратов, который напрямую зависит от качества связывания воды затворения (являющейся полярной жидкостью). С точки зрения химического взаимодействия данное утверждение – образование связей в системах твердения, состоящих из комплексных соединений переменного состава, многоаспектно. Если в состав (в структуру кристалла) входят полярные молекулы (группы), это приводит не только к большей активности ГСК, но и придает другие свойства новообразованиям. Гидросиликаты кальция становятся более активными (по сравнению с ГСК, не содержащих полярных молекул (групп)). Все эти явления из-за физико-механических, и прежде всего, химических взаимодействий на агрегативном уровне, приводящих всю систему твердения в вынужденные условия стеснения, приводят к твердению цементного микробетона [122, 175].

То есть, иными словами, химическая (гидравлическая) активность безводных силикатов и алюминатов кальция по отношению к жидкости затворения может быть объяснена с точки зрения их кристаллохимической структуры, приводящей к реакциям гидролиза и гидратации с последующей полимеризацией. При этом установлено, что в основе структуры дисперсной фазы находятся следующие анионы:  $[\text{SiO}_4]^{4-}$ ,  $[\text{AlO}_4]^{5-}$ ,  $[\text{AlO}_6]^{10-}$ ,  $[\text{FeO}_4]^{5-}$  и  $[\text{FeO}_6]^{10-}$ . Они образуют ковалентно-ионные

связи с кислородом и катионами кальция. Главной особенностью их существования считается твердое состояние, приводящее в большинстве случаев к полимеризации. Способность к полимеризации обусловлена высокими зарядами  $\text{Si}^{4+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$ , которые практически невозможно компенсировать кислородными ионами с мономерной структурой [40, 122].

Дальнейшее развитие представлений о химической природе проявления вяжущих свойств оформилось в виде теории Ю.М. Бутта, который считал, что на гидравлическую активность силикатов, алюминатов и ферритов кальция влияет характер связи между атомами кальция и кремния. Таким образом можно объяснить наличие вяжущих свойств в известных соединениях - связь между двумя атомами кремния очень прочна (например, как в волластоните -  $\text{CaOxSiO}_2$ , который не проявляет активности); в то же время ионная, силоксановая связь  $\text{Si-O-Si}$  менее сильная (ранкинит  $3\text{CaOx}_2\text{SiO}_2$  уже проявляет слабые вяжущие свойства). И, наконец, связь  $\text{Si-O-Ca-O-Si}$  быстро рвется – поэтому такие клинкерные минералы, как алит ( $\text{C}_3\text{S}$ ) и белит ( $\text{C}_2\text{S}$ ) являются веществами, явно обладающими гидравлической активностью. Установлено, что на свойства систем твердения влияет и координация атомов (так, у алюминия координация атомов может составлять 6, 7, 9), так как такая координация в совокупности с признаками нерегулярности структуры атомов свидетельствует о разнице сил связи между отдельными ионами, и, как следствие, внешние воздействия оказывают на все вещество значительно существеннее, чем на систему с равномерной координацией. Особенно в случае понижения регулярности в ближнем порядке.

На сегодняшнем этапе развития строительного материаловедения очевидно, что реакция гидратации клинкерных минералов цемента и активных ферромагнитных наполнителей проходит в несколько этапов. На первом наблюдается адсорбция полярных молекул жидкости затворения (на поверхности кристаллов), которая сопровождается процессами частичного электролитического разложения молекул воды на ионы; на втором происходит налаживание хемосорбционных связей за счет взаимодействия образовавшихся ионов с молекулами воды с формированием активных центров на поверхностях веществ.

Далее происходит протонизация с развитием ионного обмена типа, приводящая к переходу некоторого объема структурных единиц кристаллов ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  и др.) в водный раствор. Все это сопровождается присоединением полярных групп  $\text{H}^+$  и  $\text{OH}^-$  и полярных молекул воды к другим структурным единицам кристаллов. В результате образуются первичные зародыши новой фазы — гидраты  $(\text{CaO})_x(\text{SiO}_2)_y(\text{H}_2\text{O})_z$ ,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и другие. За этой стадией следует бурный переход появившихся ионов, а также гидратированных ионов  $\text{Ca}(\text{OH})^+$ ,  $(\text{H}_2\text{SiO}_4)^{2-}$ , в раствор. Это приводит к насыщению раствора, который в последствии пересыщается частицами. В результате из водного пересыщенного раствора выкристаллизовывается новая фаза (кристаллический сросток) как во всем объеме, так и на поверхности вещества.

Таким образом, в процессе химических реакций гидратации и гидролиза образуются множество разрывов химических связей и образований новых связей, связанных с переходом энергетических барьеров, обусловленных воздействием целенаправленных внутренних и внешних факторов - химическая индукция, химическое инициирование посредством специальных добавок. На этот процесс оказывает влияние и внешняя окружающая среда посредством барометрического, электрического, звукового, теплового, влажностного, гравитационного, магнитного, и других воздействий). Насколько быстро происходят химические реакции – можно судить по кинетическим характеристикам механизмов, характеризующим вероятность взаимодействия между частицами. При этом они должны обладать высокой энергией, необходимой для преодоления критического потенциального барьера, и определенным уровнем энтропийного фактора. В результате этого происходит естественный рост только тех новообразований (ГСК), которые наиболее эффективны (приспособлены) к сформировавшейся системе твердения.

Конвертерные шлаки и отходы абразивной обработки относятся к дисперсно-зернистым материалом, то есть в них содержится много тонкодисперсных частиц микронных размеров. Именно эти частицы оказывают влияние и на вид новообразований, и на строительно-технические свойства систем твердения цементных инъекционных материалов. Они обладают высокой суммарной энергией поверхности

(величина удельной поверхности конвертерных шлаков и отходов абразивной обработки металлов – больше  $300 \text{ см}^2/\text{г}$ ).

Для химически инертных, по отношению к воде, конвертерных шлаков определяющим при формировании адсорбционных слоев полярной жидкости является физическое притяжение молекул  $\text{H}_2\text{O}$  твердой дисперсной фазой. Эти силы имеют дисперсионную (близодействующие), электростатическую (дальнодействующие) и структурную природу. Молекулярные силы формируются за счет притяжения и отталкивания частиц системы. Электростатические силы возникают за счет ионных и дипольных взаимодействий.

Терминология категории «связанная вода на частицах цемента» не является унифицированной. Так, в коллоидной химии такую воду называют сольватными оболочками. В механике дисперсных систем это пленочная вода. Кроме того, общепринятым можно признать термин «граничный слой воды».

Пленочная вода значительно отличается от объемной воды, которая заполняет поры и капилляры между частицами дисперсной фазы в цементных системах твердения. Некоторыми авторами установлено, что плотность связанной воды может составлять  $1100 \text{ кг/м}^3$ ; а упругость соответствует упругости твердых тел. Этот граничный слой воды строго структурирован за счет диполей  $\text{H}_2\text{O}$  за счет электроотрицательности поверхности частиц цемента.

При этом за счет того, что пленочная вода обладает низкой растворяющей способностью, многие авторы [68, 149] утверждают, что ее функция сводится только к транспортировке поляризованных групп и ионов, а также определённых заряженных комплексов к поверхности или от поверхности цементных частиц. Поэтому именно обычная вода является поставщиком гидратных ионов, именно она растворяет клинкерные минералы. Таким образом, воздействуя на пленочную и объемную воду с помощью магнитного поля, можно добиться улучшения реологических характеристик цементных композиционных инъекционных материалов и уменьшить количество объемной воды не за счет применения дорогих пластификаторов (что при значительных объемах тампонажных работ влечет значительную

экономии), а за счет только предлагаемой технологии с использованием двухэтапной магнитной обработки.

При раскрытии вопросов природы активности минералов портландцемента интересна теория В.Н. Вернигоровой [137, 41, 64]. Именно химический и кинетический аспект формирования гидросиликатов кальция лежит в основе рассмотренного взаимодействия  $\text{SiO}_2$  с оксидом Са в системе  $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ . Причем эти же вопросы рассматривал и А. Ле Шателье, и В. Михаэлис. Уже в то время было понятно, что СаО реагирует с аморфным оксидом кремния, в результате чего образуются гидросиликаты кальция, не обладающие постоянным стехиометрическим составом. Они (ГСК) являются гелями, содержащими гидраты  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ .

Таким образом, новообразования в портландцементе в виде гидросиликатов кальция формируются за счет химических реакций между дальтонидами (молекулами воды), катионами кальция, анионами кремния, гидроксильных групп  $\text{OH}^-$ , молекул или ионов добавок с бертоллидами (силикатами кальция). То есть это действительно химический процесс, предполагающий наличие конкретной энергии активации. По мнению автора, при смешивании цемента с водой диполи  $\text{H}_2\text{O}$  притягиваются к кислотным и основным центрам минералов клинкера. В результате наблюдаются разрыв связей и самопроизвольная экзотермическая необратимая диссоциация  $\text{H}_2\text{O}$  на частицах бертоллидов.

Эти же выводы сделаны в работе П.Г. Комохова [199], который определял роль воды как энергетический силовой источник в механизмах гидратации и набора прочности цементных систем твердения.

Исследования, в том числе микроскопические, посвященные процессам взаимодействия клинкерных минералов с  $\text{H}_2\text{O}$  на поверхности частиц портландцемента доказали, что по времени первоначальное растворение минералов происходит в течение первых пяти секунд. Первичные новообразования (с отношением СаО к оксиду кремния равное трем, толщиной около 0,8 нанометров) фиксируются в промежутке от пяти секунд до одной минуты. Затем образуется вторичный гидрат (с отношением СаО к оксиду кремния равное двум, толщиной 6 нанометров). В это же время фиксируются и первые кристаллы  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  - гидроксида кальция.

Так как образующаяся пленка из гидратов и других продуктов бурной интенсивной химической реакции имеет достаточную плотность, то свободный доступ объемной воды к поверхности частиц затруднен. Поэтому все процессы значительно замедляются. Этот этап чаще всего рассматривают как индукционный, в результате которого цементный раствор не претерпевает никаких внешних изменений. При этом химические реакции продолжают, только не так интенсивно (с меньшей скоростью). Так, в пленочной жидкости концентрируются ионы  $\text{OH}^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$  и другие. В итоге система твердения становится равновесной, что в свою очередь является причиной ускорения образования ГСК.

Под первичными гидратами формируется так называемый «слой Тейлора», который состоит из твердых новообразований. Они и составляют так называемую структуру внутреннего ритма. Этот слой Тейлора интенсивно увеличивается не только количественно, но и в объеме, тем самым создавая под первичной пленкой напряжения, в результате которых пленка уничтожается и скорость химических реакций увеличивается за счет возможности проникновения воды к минералам. Кроме того, и продукты реакции (первичные и вторичные гидраты, а также портландит) выносятся в дисперсионную среду. Начинаются процессы формирования из гидратов внешней границы «сферы Тейлора» или структуры внешнего ритма – из кристаллов чешуйчатой, волокнистой и игольчатой структуры. Этот механизм структурообразования постоянно повторяется, образуя все новые сферы внутренних и внешних ритмов. Этим объясняется слоистое строение вещества из продуктов реакции вокруг каждой частицы портландцемента.

На уровне всего ЦКИМ помимо процессов, связанных с активностью цемента, необходимо рассмотреть и механизмы взаимодействия между другими дисперсными составляющими: ферромагнитными наполнителями и мелким заполнителем – кварцевым песком. Известно, что строительные-технические свойства, а особенно механические характеристики ЦКИМ определяются видом связей дисперсных частиц.

П.А. Ребиндер [149], рассматривая физико-химическую сущность дисперсных структур, полагал, что деление их на коагуляционные, конденсационные и кристаллизационные системы, позволит более точно разобраться с этим вопросом. В коагуляционных системах твердения связи между зернистыми компонентами происходят через прослойки пленочной воды, поэтому действующими являются слабые вандерваальсовские силы межмолекулярного взаимодействия. Коагуляционные системы твердения зависят от количества объемной воды, от которой будет зависеть подвижность и пластичность цементного раствора, а также прочность, которая относительно низкая.

В конденсационных системах обязательно возникают химические связи, обязательным признаком которых является контакт между зернистыми составляющими. Такие структуры обладают высокой прочностью, хрупкостью и необратимостью свойств при разрушениях (например, механических или термических воздействиях).

Кристаллизационные структуры формируются за счет соединения новообразований в пространственный кристаллический каркас. При этом формирующаяся структура должна иметь относительно правильное строение. Прочность при этом напрямую зависит от структурных характеристик.

М.М. Сычев [177] представляет механизм структурообразования системы твердения, как последовательное множество процессов.

Во-первых, в системе твердения образуются кристаллогидраты (в результате химических реакций и связывания молекул полярной  $H_2O$ ). Новообразования являются высокодисперсными частицами, в силу чего происходит переход воды в пленочное состояние [40].

Так как изначально в системе складывается высокое значение водоцементного отношения, то вследствие развивающихся процессов гидратации и гидролиза формируются стесненные условия в цементной суспензии, которые приводят к формированию коагуляционных структур.

Затем из-за насыщенности раствора и увеличения пленок жидкости частицы новообразований взаимодействуют в местах контактов вследствие электростатических и электромагнитных явлений. Пленочная жидкость становится структурированной – приобретает свойства твердого тела – так начинается процесс схватывания раствора.

Количество «твердой» (связанной) жидкости увеличивается из-за превращения безводных минералов в ГСК, которые постепенно заполняют все поровое пространство. На этом этапе интенсивно синтезируется прочность ЦКИМ, благодаря увеличению количества контактов.

Таким образом, происходит переход от конденсационных и коагуляционных структур к обладающим особой прочностью кристаллизационным (на основе химических связей). Эти изменения контактов происходят в результате уменьшения толщины пленок воды.

В результате литературного обзора были выявлены следующие положения, которые легли в основу структурообразования систем твердения цементных композиционных материалов:

- гидравлическая активность систем определяется размерами ионов, их зарядами, степенью поляризации и координационным числом;
- клинкерные минералы проявляют активность в зависимости от их электроотрицательности;
- вяжущие свойства зависят от координации активных катионов портландцемента – пониженная координация ионов кальция при взаимодействии с водой переходит в более устойчивую - повышается до шести;
- при оценке потенциала проявления активности необходимо учитывать дефекты и искажения в строении клинкерных минералов - это тоже приводит к изменению координации;
- проявление активности вследствие формирования межкристаллитных контактов в системах твердения должно быть соотнесено с возникновением координационных и водородных связей, что особенно проявляется в соединениях с ненасыщенными ионными или смешанными ионно-ковалентными связями;



- процесс структурообразования (схватывания и твердения) определяется химическими, физико-химическими и физическими взаимодействиями и сопровождается гидратообразованием.

Таким образом, цементные строительные инъекционные материалы с использованием в качестве наполнителей отходов металлургического производства, в том числе конвертерных шлаков и продуктов обточки стали абразивными инструментами, можно считать композитами, обладающими многоуровневой иерархически организованной конгломератной структурой. При этом, как на уровне цементного зерна, так и на уровне контакта с наполнителями и заполнителями, выделяются масштабные уровни, представляющие собой два компонента: пространственно-непрерывную матрицу и детерминированно-стохастически распределенные в ней инертные или частично активные упрочняющие элементы.

## 2 ОБЪЕКТЫ, МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ И РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

### 2.1 Исходные материалы, анализ их свойств и требований, предъявляемых к ним

Для разработки новых составов эффективных цементных композиционных инъекционных материалов (ЦКИМ) для заделки трещин в железобетонных конструкциях исследовались прочностные, реологические и адгезионные свойства активированных магнитным полем систем твердения, состоящих из цементно-песчаных и цементно-водных смесей с тонкодисперсным наполнителем из конвертерных шлаков и отходов обработки металлов абразивными материалами.

На основе предварительных экспериментальных данных в качестве вяжущего вещества для изготовления опытных образцов использовался портландцемент марки ПЦ-500-ДО-Н Мордовского цементного завода ПАО «Мордовцемент», как более доступный с достаточно удовлетворительными для тампонажных работ прочностными и физико-механическими характеристиками (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Физико-механические характеристики портландцемента ПЦ-500-ДО-Н ПАО «Мордовцемент»

№ п/п	Характеристики	Единица измере- ния	Численные значения	
			фактиче- ские	По ГОСТ
1.	Прочность на изгиб (возраст твердения - 28 суток)	МПа	$7,1 \pm 0,3$	5,9
2.	Прочность на сжатие (возраст твердения - 28 суток)	МПа	$52,1 \pm 2$	49,0
3	Прочность на сжатие в возрасте 3 суток	МПа	$28 \pm 1$	-
4.	Тонкость помола через сито 0,08	%	$91 \pm 2$	Не менее 85
5.	Добавки	%	Нет	-
6.	Нормальная густота цементного теста	%	$24 \pm 1$	-
7.	Сроки схватывания (час:мин.): - начало - окончание	час:мин	$2:30 \pm 1:00$ $4:00 \pm 1:20$	Не ранее 45 мин Не позднее 10 часов

Показатели по химико-минералогическому составу портландцемента ПЦ-500-ДО-Н приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Химико-минералогический состав портландцемента ПЦ-500-ДО-Н ПАО «Мордовцемент»

№ п/п	Химико-минералогический состав	Единица измерения	Численные значения	
			фактические	По ГОСТ
1.	MgO	%	1,4	Не более 5
2.	SO <sub>3</sub>	%	0,30±0,03	Не более 3,5
3	Cl	%	0,07±0,02	-
4.	CaO свободный	%	0,09	-
5.	Нерастворимый осадок	%	0,35	-
6.	Потери при прокаливании	%	0,10±0,02	-
7.	C <sub>3</sub> S	%	62±2	-
	C <sub>2</sub> S	%	15±2	-
	C <sub>3</sub> A	%	5,5±2	-
	C <sub>4</sub> AF	%	11,5±0,3	-

Мелким заполнителем в образцах из цементно-песчаных смесей являлся песок из местных карьеров. Его свойства соответствовали требованиям ГОСТ 10268-80. Характеристика основных свойств мелкого заполнителя (кварцевого песка) приведена в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Гранулометрический состав мелкого заполнителя

Номера партии	Частные и полные остатки в ситах с диаметром отверстий, мм					Модуль крупности	Пылеватые и глинистые частицы, %
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,140		
1	-	-	<u>6,5</u> 6,5	<u>52,5</u> 59,0	<u>37,0</u> 96,0	1,6	2,5
2	-	<u>2,0</u> 2,0	<u>6,0</u> 8,0	<u>43,5</u> 51,5	<u>41,5</u> 93,0	1,5	2,5

Вода для затворения вяжущего удовлетворяла требованиям ГОСТ 23732-79. Наличие в ней неорганических веществ, сахара и фенола не превышало 10 мг/л. Водородный показатель pH, определяемый потенциометрическим методом с помощью прибора ЛП-5, находился в пределах 4-10. Максимальное содержание в воде

растворимых солей, а также ионов  $SO_4^{-2}$  и  $Cl^{-1}$  не превышало предельно-допустимые значений, приведенные в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Допустимое содержание в воде растворенных солей, ионов  $SO_4^{-2}$  и  $Cl^{-1}$

Исходный материал	Максимально допустимое значение, мг/л			
	растворимых солей	взвешенных частиц	ионов	
			$SO_4^{-2}$	$Cl^{-1}$
Вода для затворения цементно-песчаных и цементно-водных смесей	2000	200	600	350

В качестве ферромагнитного наполнителя цементных матриц в составах для изготовления опытных образцов ЦКИМ использовался конвертерный шлак Новолипецкого металлургического комбината (НЛМК) и отходы обработки металлов абразивными материалами, подсобных производств НЛМК, просеянные через сито с диаметром ячеек 0,14 мм.

Минералогический состав конвертного шлака приведен в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Минералогический состав конвертерного шлака (содержание минералов, %)

Белит	Браунмелирит	Феррит, геленит	Магнетит, гематит	RO-фаза	Железосодержащая часть	Промежуточная фаза
35-45	20-28	8-18	9	3	4	12

Зерновой состав и дробимость шлака из проб, отобранных в отвалах ПАО «НЛМК», приведены в таблице 2.6

Таблица 2.6 – Зерновой состав конвертерных шлаков из отобранных проб в отвалах «ПАО» НЛМК

Место отбора конвертерных шлаков на площадках металлургического комбината	Масса, кг	Фракции, мм, %			
		0-10	10-20	20-40	более 40
Склад промежуточный	68,4	25,4	11,2	16,5	46,9
Траншея ККЦ-1	82,6	36,8	14,2	16,3	32,7
Траншея ККЦ-2	64,2	34,4	22,1	19,8	23,7
В среднем:		32,2	15,8	17,5	34,5

Содержание магнитной и железосодержащей части тонкодисперсного конвертерного шлака, просеянного через сита, отображено в таблице 2.7

Таблица 2.7 – Содержание магнитной и железосодержащей части конвертерных шлаков НЛМК

Диаметр сит, мм	Частный остаток на ситах, %	Содержание, %	
		отмагниченных компонентов	железа в магнитной части
2,5	21,9	16,5	17,2
1,6	12,7	17,4	6,5
1,0	11,1	20,9	5,8
0,4	20,9	23,8	4,1
0,1	21,3	15,4	2,5
Дно	12,1	6,0	0,7
Среднее значение		16,7	6,1

Основные физические свойства тонкомолотого шлака, используемого в образцах для определения свойств цементных ЦКИМ, приведены таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Характеристики конвертерных шлаков

№№ п/п	Свойства	Номера проб				
		1	2	3	4	Средние значения
1.	Истинная плотность, кг/м <sup>3</sup>	3500	3600	3600	3700	3600
2.	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	1702	1695	1687	1799	1721
3.	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	3122	3353	3278	3265	3254
4.	Удельная поверхность тонкомолотого наполнителя, м <sup>2</sup> /кг	302,8	302,5	304,1	303,0	303,1
5	Диаметр частиц наполнителя, (рассчитанный по удельной поверхности), мкм	-	-	-	-	6,00

Кроме конвертерных шлаков в качестве тонкодисперсного наполнителя в образцах для экспериментальных исследований, нами использовались продукты обточки стали электрокорундом нормальным, так как его физические свойства, минералогический и химический состав наиболее полно соответствовали целям и задачам исследований, поставленным в работе.

В таблице 2.9 приведены основные свойства электрокорунда нормального, используемого для изготовления опытных образцов.

Таблица 2.9 – Свойства электрокорунда нормального для обработки металла

№ п/п	Свойства	Единица измерения	Численные значения показателей
1.	Плотность	кг/м <sup>3</sup>	3850-3950
2.	Микротвердость	ГПа	18,9-19,6
3.	Предельная нагрузка	Н	8,6-19,9
4.	Абразивная способность	г	0,06
5.	Режущая способность	г/мин	0,036
6.	Насыпная плотность	кг/м <sup>3</sup>	1780
7.	Содержание ферромагнитных частиц в продуктах обточки	% по массе	43,6

## 2.2 Программа экспериментальных исследований и оборудование для определения свойств ЦКИМ

Для оценки возможности использования цементно-песчаных и цементно-водных смесей с тонкодисперсными наполнителями в качестве ЦКИМ для заделки трещин в железобетонных ограждающих конструкциях, которые в защитных сооружениях являются наружным контуром герметизации, необходимо знать их прочностные и деформативные характеристики (прочность на сжатие и изгиб, модуль упругости), адгезию, реологические свойства (вязкость и напряжение сдвига), усадку и газо- (воздухо-) проницаемость.

По прочностным свойствам ЦКИМ судят об их способности сопротивляться процессу трещинообразования при герметизации дефектных зон. По значениям адгезионных характеристик ЦКИМ можно говорить о достаточности их сцепления с поверхностями трещин в процессе твердения в местах заделки. Знание реологических свойств ЦКИМ необходимо для организации качественной технологии тампонажных (инъекционных) работ.

В связи с использованием для приготовления ЦКИМ тонкодисперсных ферромагнитных наполнителей из конвертерного шлака и отходов обработки металла абразивными материалами (электрокорундом) целесообразно также определить и

некоторые другие их дополнительные свойства: магнитную восприимчивость ЦКИМ, магнитную индукцию и магнитодвижущую силу в дефектной зоне в процессе заполнения трещины тампонажной магнитной смесью под воздействием локального магнитного поля (особенно, когда с помощью ЦКИМ заделываются трещины на контакте металл-бетон). При определенных параметрах локального магнитного поля, давление нагнетания тампонажной смеси в трещину можно уменьшать на величину магнитодвижущей силы. Приведенные обоснования необходимости исследования конкретных свойств ЦКИМ позволили определить программу экспериментальных исследований и необходимый перечень испытательного оборудования (таблица 2.10).

Таблица 2.10 – Программа экспериментальных исследований и перечень испытательного оборудования

№№ п/п	Исследуемые свойства в процессах экспериментальных исследований	Образцы, мм	Испытательное оборудование
1	2	3	4
1.	Прочность на сжатие цементно-песчаных ТКМ для широких трещин	Кубы 40х40х40	Машина испытательная универсальная ИР 5082-50
2.	Прочность на изгиб цементно-песчаных ТКМ для широких трещин	Призмы 40х40х160	
3.	Прочность на сжатие цементно-водных ТКМ для узких трещин	Цилиндры диаметр 40	
	Прочность на растяжение при изгибе цементно-водных ТКМ для узких трещин	Призмы 40х40х160	
	Удельная поверхность и диаметр частиц наполнителя	-	Поверхностемер ПМЦ - 500
5.	Усадочные деформации	Призмы 100х100х 400	Индикаторы часового типа, штанги, хомуты с винтовым креплением
6.	Расплыв конуса цементно-водных смесей	-	Конус и встряхивающий столик
7.	Осадка конуса «СтройЦНИЛ» в цементно-песчаных смесях	-	Конус «СтройЦНИЛ» и стандартное ведро
8.	Напряжение сдвига ЦКИМ	-	Самостоятельно изготов- ленное устройство (см. п. 2.11)
9.	Адгезия	-	Адгезиметр типа «Константа»
10.	Магнитная индукция от источников локального магнитного поля в трещине на контакте металл-бетон	Образцы металла разной тол- щины: 3; 5; 10	Измеритель магнитной индукции

Окончание таблицы 2.10

1	2	3	4
11.	Магнитная восприимчивость смеси ТКМ (по методу Квинке)	-	Самостоятельно изготовленное устройство (см. п. 2.10)
12.	Газо- (воздухопроницаемость) ЦКИМ	Кубы 100x100x100	Микроманометр ММН, газо-счетчик ГСБ-400

### 2.3 Методики определения прочностных свойств цементных композиционных инъекционных материалов

Механические свойства (прочность на сжатие и прочность при изгибе) определялись по образцам со следующими размерами - 40×40 и 40×40×160 мм, которые набирали прочность в естественных условиях при температуре  $(18 \pm 2) ^\circ\text{C}$  (рисунок 2.1).



Рисунок 2.1 – Образцы в виде призм 40x40x160 мм

На рисунке 2.2 показаны схемы испытания материалов на прочность, на сжатие и на изгиб.

Прочность на сжатие  $R_c$  и на изгиб  $R_f$  определялась по формулам:

$$R_c = \frac{P}{A}, \quad (2.1)$$



$$R_t = \frac{M}{W}, \quad (2.2)$$

где  $P$  – разрушающая нагрузка, Н;  $A$  – площадь поперечного сечения образца, мм<sup>2</sup>;  $M$  – изгибающий момент, Н·мм;  $W$  – момент сопротивления материала образца, мм<sup>3</sup>.

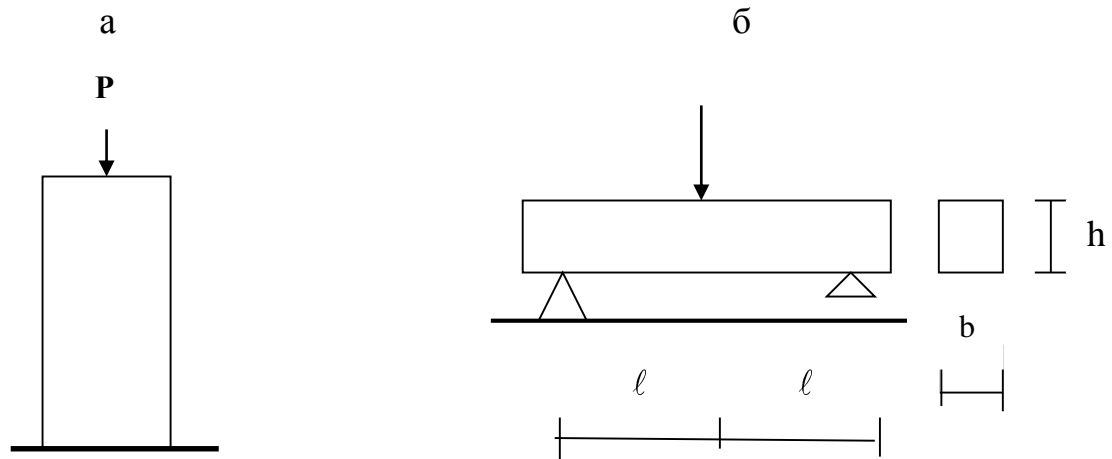


Рисунок 2.2 – Схемы испытания экспериментальных образцов: а - на сжатие и б- на растяжение

В соответствии с ГОСТ 310.4-81 прочностные характеристики цементных композиционных инъекционных материалов (ЦКИМ) определялись по максимальному напряжению в образцах в момент их разрушения. При этом в качестве испытательного оборудования использовалась универсальная испытательная машина ИР 5082-50, принцип работы которой основан на принудительном нагружении образца при одновременном измерении нагрузки и соответствующей ей величины деформации с передачей данных на системный блок и монитор компьютерного комплекса (рисунок 2.3).



Рисунок 2.3 – Универсальная испытательная машина ИР 5082-50 – общий вид

## 2.4 Методика оценки адгезионных свойств ЦКИМ

Адгезионные характеристики ЦКИМ определялись с помощью механического адгезиметра «Константа-А» (рисунок 2.4). В основу определения адгезионных свойств ЦКИМ был положен принцип измерения усилия отрыва металлического грибка от материала испытываемого затвердевшего образца. Усилие отрыва создавалось поворотным устройством адгезиметра, состоящим из пары: винт-гайка и взводящий пружинный механизм. Количественно усилие отрыва определялось по отклонению стрелки адгезиметра «Константа-А» относительно шкалы [175].

Процесс определения величины сцепления ЦКИМ с металлом и бетоном был организован в два этапа. На первом этапе производилась подготовка прибора, на втором – оценка адгезионных свойств путем отрыва грибка от поверхности затвердевшего в течение семи суток покрытия из ЦКИМ, заключенного во внутреннюю круговую полость металлической кольцевой прокладки. Толщина покрытия (3 мм) была равна толщине кольцевой прокладки.



Рисунок 2.4 – Адгезиметр механический «Константа А»: 1 – поворотный механизм пружинного нагружающего устройства; 2 – грибок; 3 – захватный механизм

Расчет величины предельного напряжения сцепления составов ЦКИМ с металлом и бетоном производился по формуле:

$$\sigma_{co} = \frac{P_0}{A_0}, \quad (2.3)$$

где  $\sigma_{co}$  – предельное напряжение сцепления покрытия из ЦКИМ (на отрыв), Па;  $P_0$  – сила отрыва, Н;  $A_0$  – площадь отрыва (площадь нижней грани грибка), мм<sup>2</sup>.

## 2.5 Методика определения удельной поверхности и диаметра частиц ферромагнитного наполнителя

Оценка значений удельной поверхности тонкодисперсных наполнителей из конвертерного шлака и отходов обработки металлов электрокорундом производилась с помощью специального прибора – поверхностемера ПМЦ -500 (рисунок 2.5). Указанный параметр основан на принципе использования уравнения Козени - Кармана, которое устанавливает, как зависит удельная поверхность материала от скорости фильтрации воздуха при прохождении через слой воздухопроницаемой прокладки [98].

Методика определения удельной поверхности тонкодисперсных наполнителей состояла из следующих этапов. ПМЦ -500 размещали в сухом помещении. В манометре прибора с подкрашенной дистиллированной водой уровень жидкости устанавливали на отметку «ноль». После чего оценивали поверхностемер на герметичность с учетом того, что в процессе создания разряжения в манометре ПМЦ-500 уровень жидкости не может снизиться больше, чем на два миллиметра в течение тридцати минут.

Затем тонкодисперсный наполнитель (или песок) высушивался до постоянной массы и охлаждался до комнатной температуры, после чего навеску вещества насыпали в кювету с предварительно уложенным в нее кружком фильтровальной бумаги, выравнивали слой материала и прикрывали вторым кружком фильтровальной бумаги. С помощью нониуса на планке поршня и шкалы на внешней поверхности кюветы измеряли высоту слоя исследуемого материала. Далее поршень удалялся из кюветы, открывался кран и при помощи системы манометров создавалось разряжение под слоем исследуемого вещества. По секундомеру замеряли время  $T$  прохождения мениска жидкости между рисками на шкале ПМЦ-500 (после закрытия крана). С учетом толщины слоя  $L$  исследуемого материала и температуры воздуха в помещении  $t$  °С по приложению к паспорту прибора определяли так называемый рабочий параметр  $M$ .



Рисунок 2.5 – Прибор ПМЦ-500 для определения удельной поверхности порошкообразных материалов

На основе зафиксированных данных определяли удельную поверхность испытуемого наполнителя по следующей формуле:

$$S_i = K \frac{M \cdot \sqrt{T_i}}{10m}, \quad (2.4)$$

где  $S_i$  – удельная поверхность материала,  $\text{м}^2/\text{кг}$ ;  $K$  – коэффициент, постоянный для ПМЦ-500;  $M$  – рабочий параметр, который определяется по высоте вещества в кювете с учетом температуры воздуха по приложению паспорта поверхностемера [50];  $T_i$  – время прохождения мениска жидкости в трубке манометра между рисками;  $m$  – масса пробы испытуемого наполнителя.

Определение размера частиц ферромагнитного наполнителя производилось исходя из следующей зависимости:

$$S_i = \frac{N\pi d^2}{m}, \quad (2.5)$$

где  $N$  – количество частиц,  $d$  – диаметр зерен;  $m$  – масса пробы.

Учитывая, что плотность наполнителя  $\rho$  определяется выражением

$$\rho = \frac{6m}{N\pi d^3}, \quad (2.6)$$

диаметр частиц ферромагнитных наполнителей рассчитывали по формуле [51]

$$d = \frac{6}{S_i \rho} \quad (2.7)$$

## **2.6 Методика определения газонепроницаемости (герметичности) трещин на поверхностях раздела металл-бетон (бетон-бетон)**

Качество заделки трещин в железобетонных конструкциях можно определять с помощью такого показателя, как сопротивление воздухопроницанию ( $R_{\text{гр}}$ ) через известную площадь дефектного места. Именно такую рекомендацию предлагают некоторые исследователи [29, 68].

Методика исследования воздухопроницаемости мест заделки трещин с помощью ЦКИМ разработана на основе требований ГОСТ 25891-83 и с учетом следующей научной гипотезы. При фиксированных ламинарных параметрах фильтрации количество газа  $V$ , проходящего через площадь  $A$  гомогенного материала (толщиной  $\delta$ ) за время  $t$  при перепаде давления с обеих сторон ограждения  $\Delta p$ , можно определить по закону Ланга [26, 29]

$$V_a = \frac{K_{\text{гр}} \Delta p A t}{\delta}, \quad (2.8)$$

где  $k_{\text{гр}}$  – коэффициент воздухопроницаемости,  $\text{м}^3/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{даПа})$ .

Откуда определяемый параметр – коэффициент воздухопроницаемости можно определять из зависимости:

$$K_{\text{гр}} = \frac{V_a \delta}{\Delta p A t}. \quad (2.9)$$



Экспериментально определить коэффициент воздухопроницаемости можно на установке, которая представлена на рисунке 2.6.

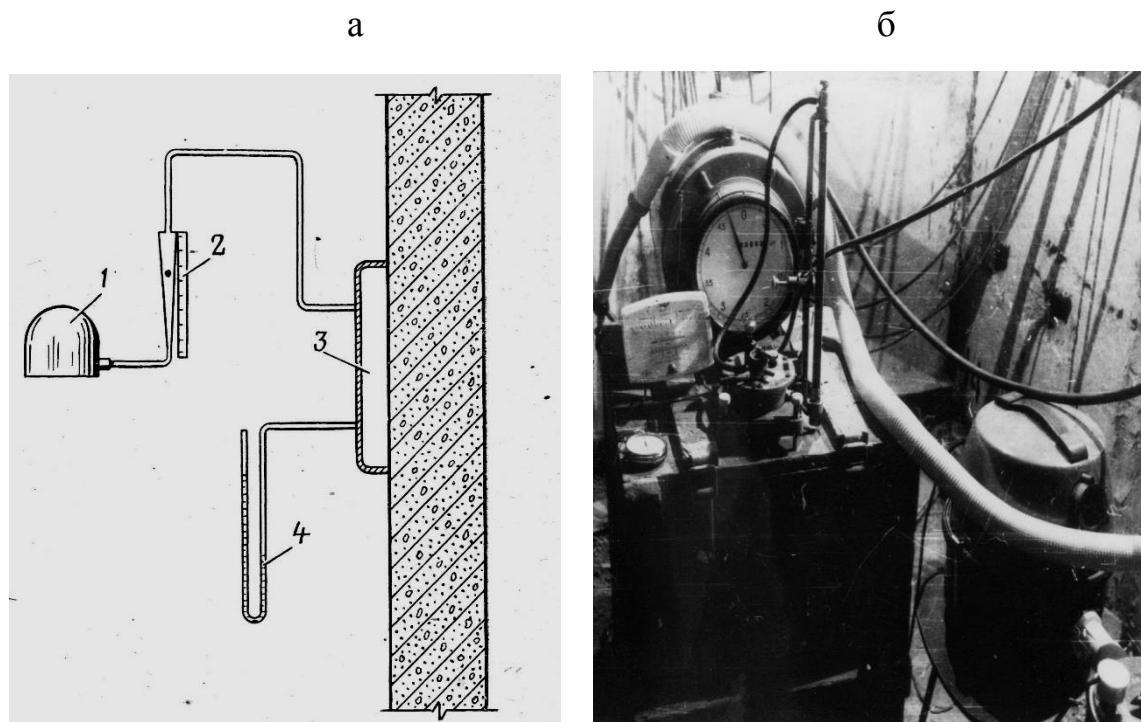


Рисунок 2.6 – Оборудование для определения газопроницаемости мест инъекционного уплотнения трещин в конструкции: а – схема прибора; б – общий вид установки, где 1 – воздуходувка (пылесос); 2 – ГСБ-400 - газосчетчик; 3 – вакуумная камера; 4 – ММН-250 – манометр

Методика оценки сопротивления воздухопроницанию трещины, в которую инъекционным давлением закачивалась тампонажная смесь из ЦКИМ, включала следующие рабочие операции. На место расположения трещины устанавливалась вакуумная камера, имеющая внизу два штуцера. За счет 1-ого штуцера через ГСБ-400 в дефектное место подавался воздух. Затем манометром ММН-250 с помощью второго штуцера определялось избыточное давление газа в вакуумной камере. Подача воздуха в вакуумную камеру обеспечивалась за счет работы воздуходувки любого типа (например, с помощью обычного пылесоса).

Перепад давления газа регулировался автоматическим трансформатором Латр-1М. Объем газа, прошедшего через исследуемый материал, измерялся посредством газосчетчика. Перед началом работы экспериментального оборудования фиксировались температура, давление и влажность окружающего воздуха. После этого

обеспечивали создание ступенчатого перепада давления – 40, 80, 120, 160, 200 даПа (мм вод. ст.) по обе стороны экспериментального материала.

Как только режим фильтрации стабилизировался, фиксировали начальный показатель по шкале ГСБ - 400  $n_{i-1}$  и включали таймер. Через пять минут оборудование и таймер отключали. Объем газа, который прошел через отремонтированный стык, рассчитывали исходя из разности двух последующих отсчетов газового счетчика ( $q = n_{i-1} - n_i$ ). Количественно расход воздуха определяли следующим образом:

$$V_a = \frac{n_{i-1} - n_i}{t}. \quad (2.10)$$

Для сопоставимости результатов массового расхода воздуха  $Q$ , полученных при разных условиях, расчет воздухопроницаемости рекомендуется дополнить перерасчетом количества фильтрации воздуха по формуле:

$$Q = \rho_a V_a,$$

где  $\rho_a$  – плотность воздуха при атмосферном давлении и температуре условий эксперимента, кг/м<sup>3</sup>.

Величина перепада давлений в вакуумной камере рассчитывалась исходя из формулы:

$$\Delta p = k \Delta p_i, \quad (2.11)$$

где  $k$  – расчетный коэффициент манометра ММН-250, учитывающий угол наклона измерительной трубки.

$k_{gp}$  (коэффициент воздухопроницаемости) определяли для всех значений ступенчатых перепадов давления в вакуумной камере. Исходя из результатов, строились зависимости и оценивались режимы фильтрации газа через опытный образец (ламинарный или турбулентный). После чего вычислялось сопротивление воздухопроницанию  $R_{gp}$ :

$$R_{gp} = \frac{1}{K_{gp}}, \quad (2.12)$$

где  $R_{gp}$  – сопротивление воздухопроницанию, (м·ч·даПа)/м<sup>3</sup>.



## **2.7 Методика оценки магнитной индукции на поверхности металла от источника внешнего локального магнитного поля**

Для исследования параметров локального магнитного поля на поверхности металлических образцов, имитирующих закладную деталь входов и вводов ограждающих конструкций защитных сооружений, была смонтирована специальная лабораторная установка, включающая электромагнит; прибор для определения параметров тока в обмотке катушки электромагнита; автотрансформатор Латр-1М для регулирования величины напряжения и силы тока, селеновый выпрямитель для создания параметров постоянного тока в обмотке катушки электромагнита.

Магнитную индукция локального магнитного поля на поверхностях образцов металла противоположных установке электромагнита, который имитирует закладную деталь входов и вводов ограждающих конструкций защитных сооружений, определяли приборами: измерителем параметров электрического и магнитного поля ВЕ – и измерителем магнитной индукции с датчиком Холла (рисунок 2.7).

Испытываемыми образцами являлись металлические пластины из стали Ст3 толщиной: 3; 5 и 10 мм. Их толщина соответствовала толщине натуральных металлических комингсов входов в защитные сооружения и толщине фланцев для ввода в эти сооружения трубопроводов инженерных коммуникаций, на контактных поверхностях с бетоном, в которых возникают трещины от усадочных деформаций бетона.

Полученные значения магнитной индукции определяли требуемые параметры магнитной обработки цементно-песчаных и цементно-водных смесей на втором этапе активирования цементно-водных систем ЦКИМ.

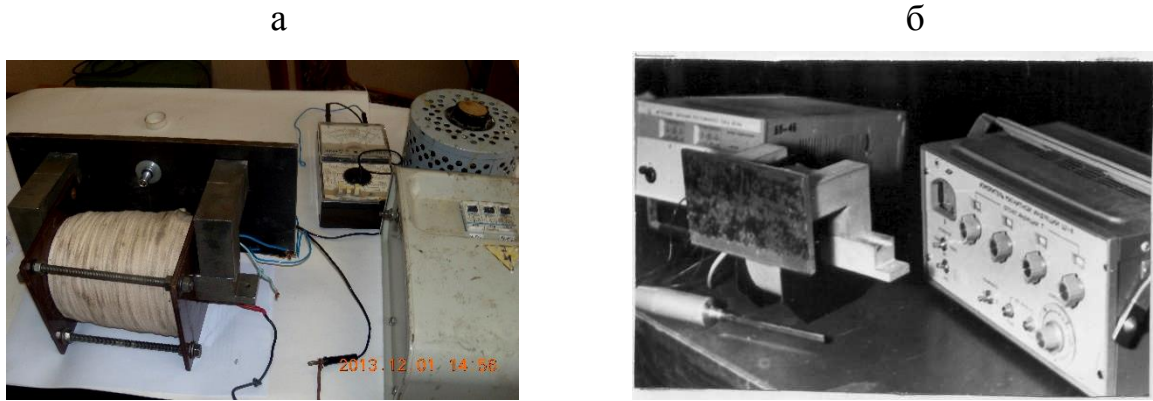


Рисунок 2.7 – Приборы для измерения магнитной индукции на поверхностях металлических образцов: а - измерителем параметров электрического и магнитного поля ВЕ – метр; б – измерителем магнитной индукции с датчиком Холла

## 2.8 Измерение магнитной индукции в полости катушки для оценки параметров активирования воды и ЦКИМ

Активирование воды для изготовления образцов ЦКИМ производилось магнитным потоком, образованным внутри катушки электромагнита (рисунок 2.8а). Численные значения магнитной индукции определялись расчетным способом по величине силы тока, отслеживаемого амперметром, и числу витков в обмотке катушки электромагнита с учетом размеров ее конструктивных элементов [5, 8, 9] (рисунок 2.8б).

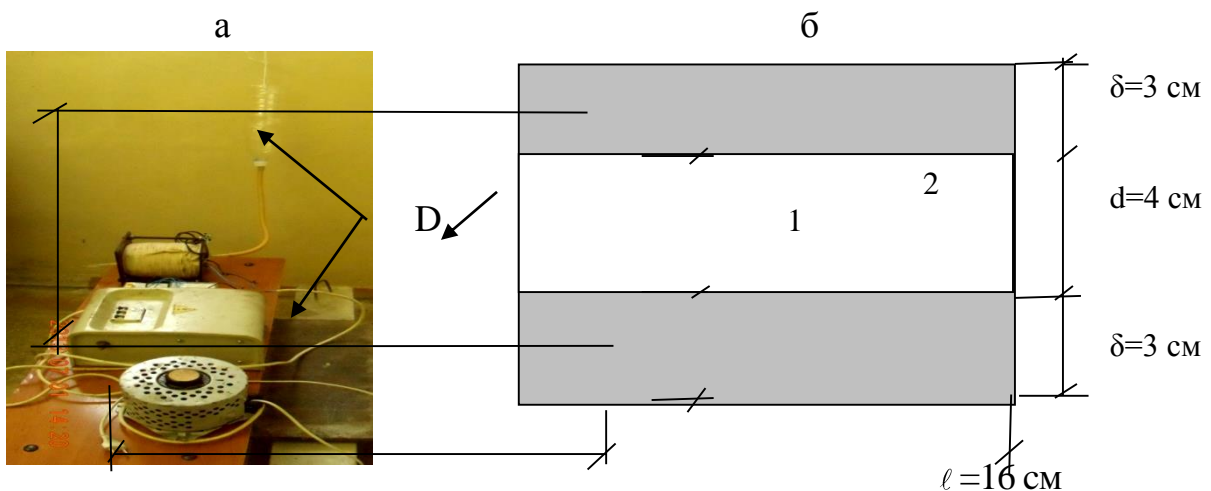


Рисунок 2.8 – Общий вид установки по активированию воды (а) и схема катушки электромагнита (б): 1 – обмотка катушки; 2 – полость катушки

### Методика расчета магнитной индукции в полости катушки

1. Определение индуктивности катушки электромагнита:

$$L = \frac{0,08D^2N^2}{3D + 9\ell + 10\delta}, \quad (2.13)$$

где  $L$  – индуктивность катушки электромагнита, Гн;  $D$  – средний диаметр катушки, см;  $N$  – число витков обмотки катушки электромагнита, шт;  $\ell$  – длина катушки, см;  $\delta$  – толщина обмотки катушки, см.

2. Определение магнитного потока:

$$\Phi_i = L \cdot I_i, \quad (2.14)$$

где  $\Phi_i$  – магнитный поток, Вб;  $I_i$  – сила тока в обмотке катушки электромагнита, А.

3. Определение магнитной индукции:

$$B_i = \frac{\Phi_i}{A}, \quad (2.15)$$

где  $A$  – площадь поперечного сечения полости катушки электромагнита, м<sup>2</sup>.

### 2.9. Методика оценки усадочных деформаций ЦКИМ

Усадочные деформации ЦКИМ определялись на образцах 100×100×400 мм в течение года. Образцы хранились в лабораторном помещении в обычных условиях с температурой  $(18 \pm 2)^\circ\text{C}$  при влажности  $(60 \pm 10)\%$  (рисунок 2.9).

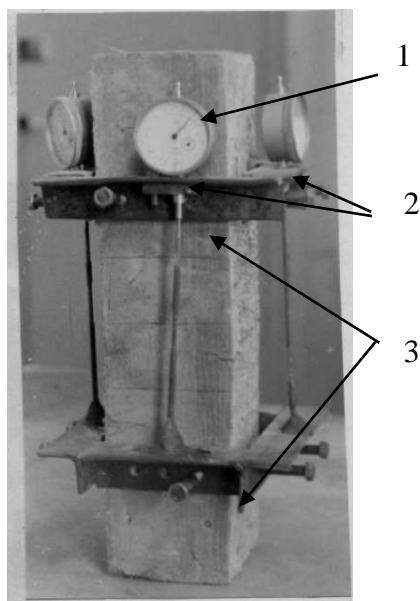


Рисунок 2.9 – Образец и измерительные средства для оценки усадочных деформаций ЦКИМ: 1 – образец 100 x100 x 400 мм; 2 – хомуты из уголкового стали; 3 – индикатор часового типа; 3 – штанга (стальной электрод для сварочных работ)

Численные значения усадочных деформаций ЦКИМ ( $\varepsilon_y$ ) определялись как отношения длины усадки материала образцов, фиксируемой индикаторами часового типа к длине базы замера, то есть к расстоянию между полками хомутов:

$$\varepsilon_y = \frac{\Delta \ell}{\ell}.$$

## 2.10 Исследования магнитной восприимчивости ЦКИМ

Оценка магнитной восприимчивости материалов ЦКИМ производилась по методу Квинке – по высоте изменения мениска жидкой фазы смесей  $\Delta h$  в капилляре под воздействием магнитного поля (рисунок 2.10):

$$\Delta h = \frac{H_0^2 (\chi - \chi_0)}{2g}, \quad (2.16)$$

где  $\Delta h$  – изменение уровня высоты жидкости;  $H$  – напряженность магнитного поля;  $\chi$  – магнитная восприимчивость вещества;  $\chi_0$  – магнитная восприимчивость воздуха [53].

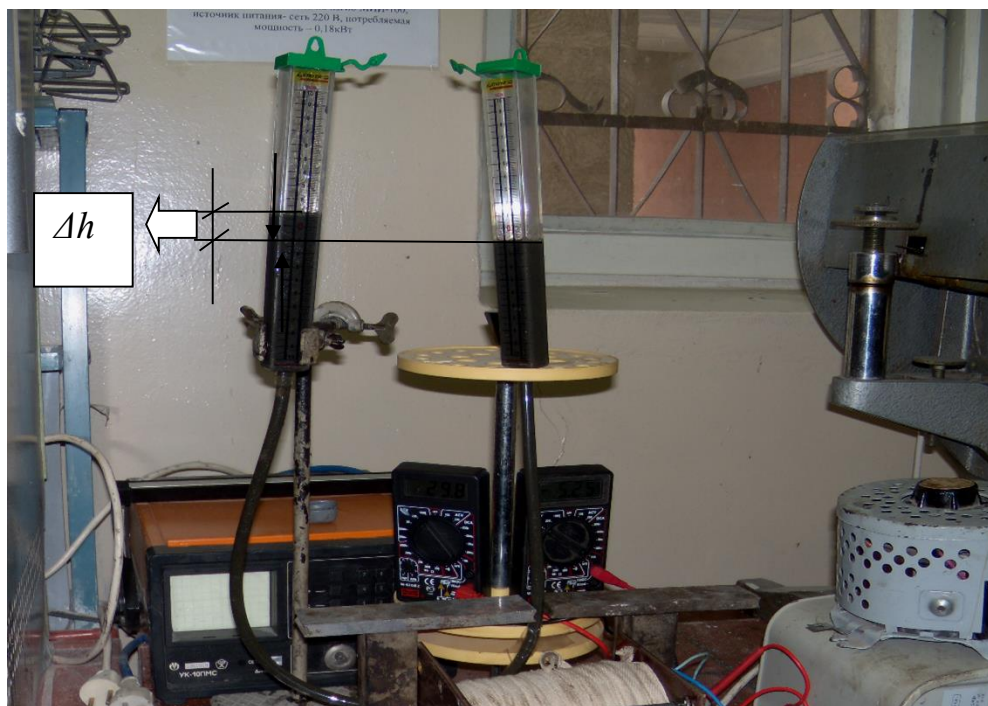


Рисунок 2.10 – Экспериментальное оборудование для оценки магнитной восприимчивости инъекционных смесей ЦКИМ

Магнитная восприимчивость воздуха  $\chi_0$  – параметр известный, напряженность магнитного поля определялась по величине магнитной индукции, а изменение высоты мениска замерялось визуальным способом [19].

### 2.11 Методика оценки напряжений сдвига смесей ЦКИМ

Для оценки напряжений сдвига смесей ЦКИМ разного состава использовалось устройство из градуированного стеклянного цилиндра с поршнем и медицинский тонометр (рисунок 2.11). Предварительная тарировка позволила установить начальные напряжения ( $\tau_0$ ), создаваемые медицинским тонометром при перемещении поршня в стеклянном цилиндре без смесей ЦКИМ за счет давления воздуха, создаваемого грушей (рисунок 2.12). Затем, с учетом тарировочных данных, с помощью все того же давления воздуха, осуществлялся сдвиг поршня с цементными смесями ЦКИМ разных составов с определением величины напряжения этого сдвига ( $\tau_{nc}$ ).

Численные значения напряжений сдвига каждого состава смесей ЦКИМ определялись как разность напряжений  $\tau_{\text{пс}}$  и  $\tau_0$ :

$$\tau_c = \tau_{\text{пс}} - \tau_0 \quad (2.16)$$

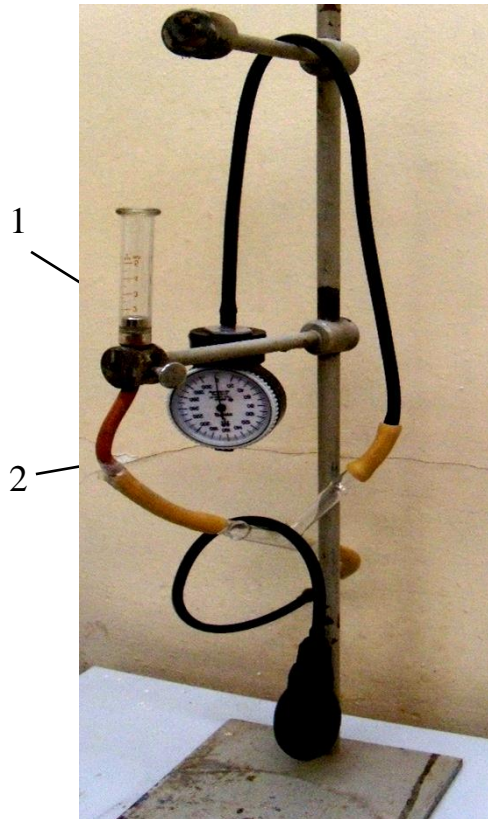


Рисунок 2.11 – Устройство для определения напряжения сдвига смесей ЦКИМ: 1 – стеклянный градуированный цилиндр; 2 – медицинский тонометр

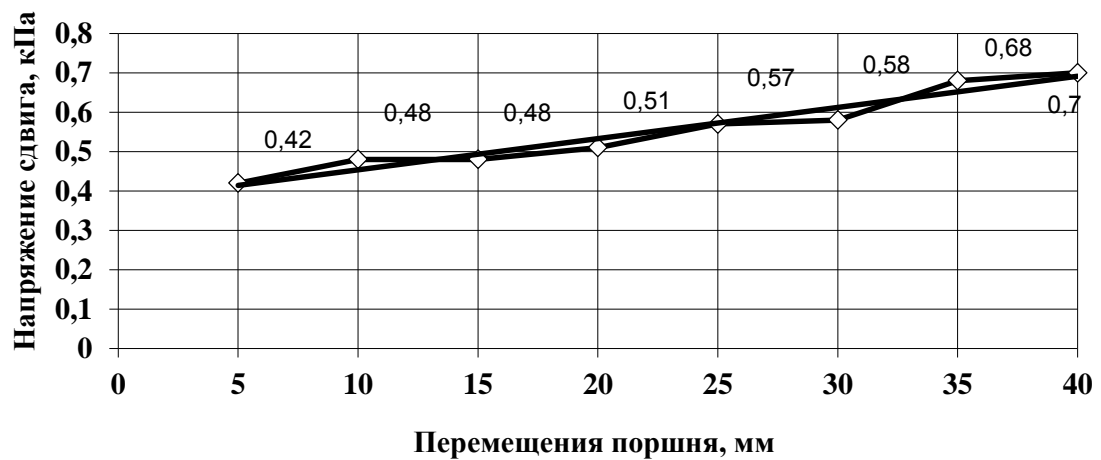


Рисунок 2.12 – Тарировочный график зависимости напряжений сдвига поршня в стеклянном цилиндре от его перемещений

## 2.12 Математическое планирование экспериментов

Для оптимизации составов ЦКИМ по прочностным характеристикам был проведен полный факторный эксперимент типа  $N=2^3$ , где  $N$  – число опытов, 2 – число уровней варьирования факторов и 3 – число независимых переменных по методикам, рекомендуемым в литературных источниках [114, 4, 71, 174, 139, 140].

Планирование эксперимента основывалось на том, что в пределах изменения уровней варьирования модель будет иметь вид однородного линейного уравнения следующего вида:

$$Y(R)=B_0+\sum_{i=1}^n B_i X_i, \quad (2.17)$$

где  $Y(R)$  – функция отклика;  $B_0, B_i$  – коэффициенты уравнения регрессии;  $X_i$  – факторы.

Коэффициенты  $B_0$  и  $B_i$  для принятой модели определялись по формулам:

$$B_0 = \sum_{u=1}^N \frac{\bar{Y}_u}{N}, \quad (2.18)$$

$$B_i = \frac{(\sum_{u=1}^N X_{iu} \cdot \bar{Y}_u)}{N}, \quad (2.19)$$

где  $u=1 \dots N$  – количество опытов в плане эксперимента.

Перевод от натуральных значений факторов к кодированным и обратно осуществлялся по следующим формулам:

$$X_i = \frac{(z_i^0 - z_i^{\min})}{J_i}, \quad (2.20)$$

$$J = \frac{z_i^{\max} - z_i^{\min}}{2}, \quad (2.21)$$

где  $x_i$  – кодированное значение  $i$ -го фактора;  $z_i$  – натуральное значение  $i$ -го фактора;  $J_i$  – интервал варьирования  $i$ -го фактора;  $z_i^0$  – среднее значение  $i$ -го фактора.

Эксперимент проводился с фиксированием значений основных параметров, характеризующих состав ЦКИМ. В целях исключения некорректных минимальных

и максимальных данных рассчитывали  $r$ -критерий (расчетный  $r_p$  и табличный  $r_T$  по приложению 2 [71]) и среднеквадратическую ошибку измерений –  $S_u$ :

$$r = \frac{|y^{\max} - y|}{S_u \cdot \sqrt{\frac{\kappa - 1}{\kappa}}}, \quad (2.22)$$

$$S_u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{\kappa} (y_i - \bar{y})^2}{\kappa - 1}}, \quad (2.23)$$

где  $\kappa$  – количество экспериментов.

Необходимое условие –  $r_p \leq r_m$ . Если  $r_p \geq r_m$ , то полученный результат является неточным, и в расчетах не используется.

Затем рассчитывались дисперсии и определялись средние значения параметров оптимизации каждого эксперимента. Для проверки однородности дисперсий и планировании эксперимента использовали критерий Кохрена ( $G$ ). При этом дисперсия в каждой строке матрицы рассчитывалась по следующему выражению:

$$S^2_u = \frac{\sum_{i=1}^{\kappa} (y_i - \bar{y})^2}{\kappa - 1}. \quad (2.24)$$

После чего определялась максимальная дисперсия, которая делилась на сумму всех дисперсий матрицы:

$$G_p = \frac{S^2_{u \max}}{\sum_{u=1}^N S_u^2}. \quad (2.25)$$

Расчетное значение критерия Кохрена  $G_p$  рассчитывалось при числе степеней свободы  $\nu = \kappa - 1$  и  $\nu = N$  (где  $N$  – было число всех опытов плана, а  $\kappa$  – число параллельных опытов) и сравнивалось с табличным значением  $G_T$ , определяемым по приложениям 3 и 4 [71]. Если выполнялось условие ( $G_p \leq G_T$ ) – расчетное значение Кохрена не превышало табличной, то дисперсии являются однородными.

Некоторые из полученных коэффициентов уравнений регрессии могут не оказывать существенного влияния на поведение всей системы в целом. Поэтому



для каждого коэффициента по критерию Стьюдента проверялась их значимость и определялся доверительный интервал  $\Delta b$  по формуле:

$$\Delta b = \pm t \cdot \sqrt{\frac{S^2_{\bar{y}}}{N}}, \quad (2.26)$$

где  $t$  – критерий Стьюдента, принимаемый по приложению 6 [96].

Общая дисперсия среднего  $S^2_{\bar{y}}$  определялась по формуле

$$S^2_{\bar{y}} = \frac{\sum_{u=1}^N S^2_u}{N \cdot K}. \quad (2.27)$$

Критерий Фишера ( $F$ -критерий) служит для определения адекватности математической модели основным строительно-техническим свойствам исследуемой системы. При этом была определена дисперсия адекватности (остаточная дисперсия)  $S^2_{ad}$  как отношение остаточной суммы квадратов  $S^2_{ост}$  к числу степеней свободы  $f_{ad}$ .

$$S^2_{ad} = \frac{S^2_{ост}}{f_{ad}} = \frac{\sum_{u=1}^N (y^p_u - \bar{y}_u)^2}{N - z}, \quad (2.28)$$

где  $f_{ad}=N-z$  – число степеней свободы;  $z$  – число значимых коэффициентов системы;  $y^p_u$  – расчетный параметр оптимизации для каждого эксперимента. После этого вычислялось расчетное значение критерия Фишера  $F_p$ :

$$F_p = \frac{S^2_{ad}}{S^2_{\bar{y}}}, \quad (2.32)$$

которое сравнивалось с табличным критерием Фишера  $F_T$ .

Значение  $F_T$  принималось по приложению 8 [71] при уровне значимости  $q=0,01$  и числе степеней свободы  $f_{ad}=N-z=8-3=5$ .

Полученная модель является адекватной, если выполняется условие  $F_p \leq F_T$ .

### **3 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СВОЙСТВ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ИНЪЕКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

#### **3.1 Оценка прочностных, адгезионных свойств ЦКИМ с наполнителями из конвертерного шлака и отходов обработки металлов абразивным инструментом**

Оценка прочностных и деформативных свойств ЦКИМ производилась методом разрушения образцов на универсальной испытательной машине ИР 5082-50 [21, 25]. Адгезионные характеристики ЦКИМ, определяющие их способность сцепления с материалами ограждающих конструкций зданий и сооружений, исследовались с помощью адгезиметра «Константа-А» [22, 43]. Характеристика объектов и методы экспериментальных исследований прочностных и адгезионных свойств ЦКИМ приведены в разделе 2. Активация воды для изготовления испытываемых образцов осуществлялась с помощью специально сконструированного и изготовленного устройства [77] (рисунок 3.1).

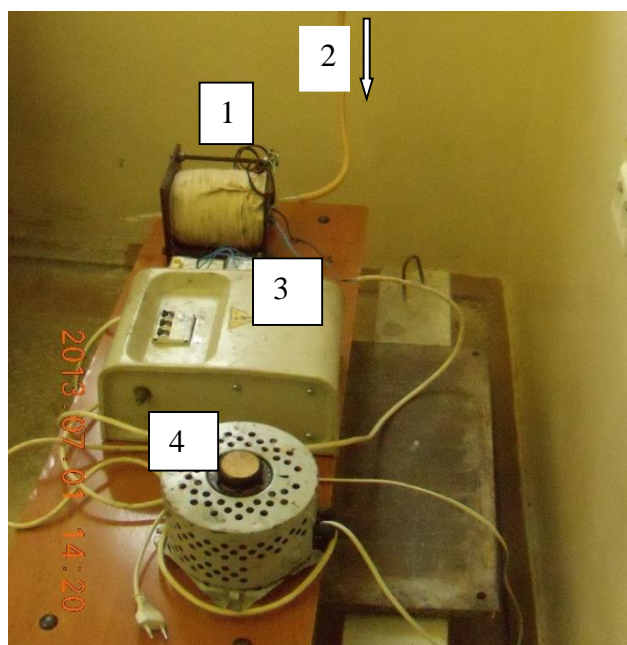


Рисунок 3.1 – Устройство для активации воды и водных систем ЦКИМ: 1 – катушка электромагнита 2 – транспортный трубопровод от системы водоснабжения; 3 – преобразователь переменного тока в постоянный; 4 – автотрансформатор (Латр-1М)

Процесс транспортировки воды через локальное магнитное поле осуществлялся через сменные трубопроводы с диаметрами поперечного сечения  $d_1 = 0,47$  см и  $d_2 = 0,88$  см при скоростях ее движения  $v_1 = 96$  см/с и  $v_2 = 130$  см/с [72, 73]. Время активации воды магнитным полем в экспериментальных исследованиях составляло  $t_1 = 15$  с и  $t_2 = 3$  с и его численные значения рассчитывались по формуле:

$$t_i = \frac{V}{A_i \cdot v_i}, \quad (3.1)$$

где  $t_i$  – время активации воды, с;  $V$  – объем активированной воды,  $V = 250$  см<sup>3</sup>;  $A_i$  – площадь поперечного сечения транспортного трубопровода, см<sup>2</sup>;  $v_i$  – скорость движения воды в транспортном трубопроводе, см/с.

Оптимальное численное значение индукции магнитного поля для активации воды и водных систем ЦКИМ  $B = 0,378$  мТл было определено по экспериментальным данным реологических свойств их смесей [84, 85, 86]. Конкретно – по диаметру распыла конуса смесей разных составов ЦКИМ на встряхивающем столике. Результаты экспериментальных данных приведены на рисунке 3.2.

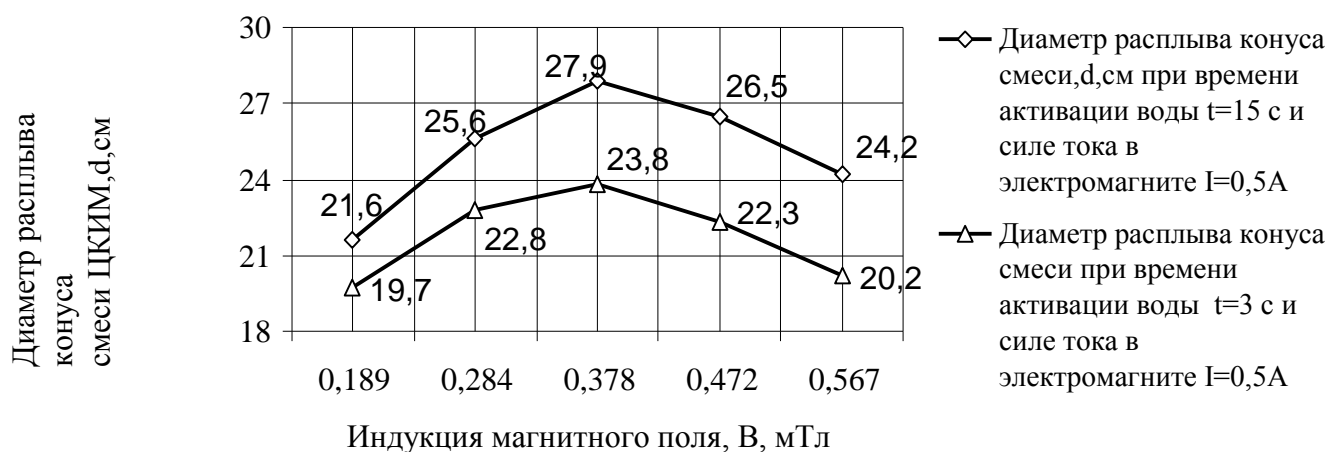


Рисунок 3.2 – Графические зависимости «распыл конуса смесей – индукция магнитного поля» процесса активации воды и водных систем ЦКИМ

Оценка прочностных и упругих свойств ЦКИМ для заделки трещин шириной 0,3-0,5 мм и 0,5-1,0 мм производилась в процессе разрушения образцов двух типов [87, 88], структура которых упрочнялась тонкомолотыми добавками из конвертерного шлака и отходов обработки металлов абразивным инструментом, свойства которых отображены в главе 1 данной диссертационной работы.

Результаты экспериментальных исследований позволили определить прочностные, деформативные и адгезионные свойства активированных цементно-водных композиционных инъекционных материалов с наполнителем из тонкомолотого конвертерного шлака, параметры которых приведены на рисунках 3.3 – 3.10 и в таблице 3.1.

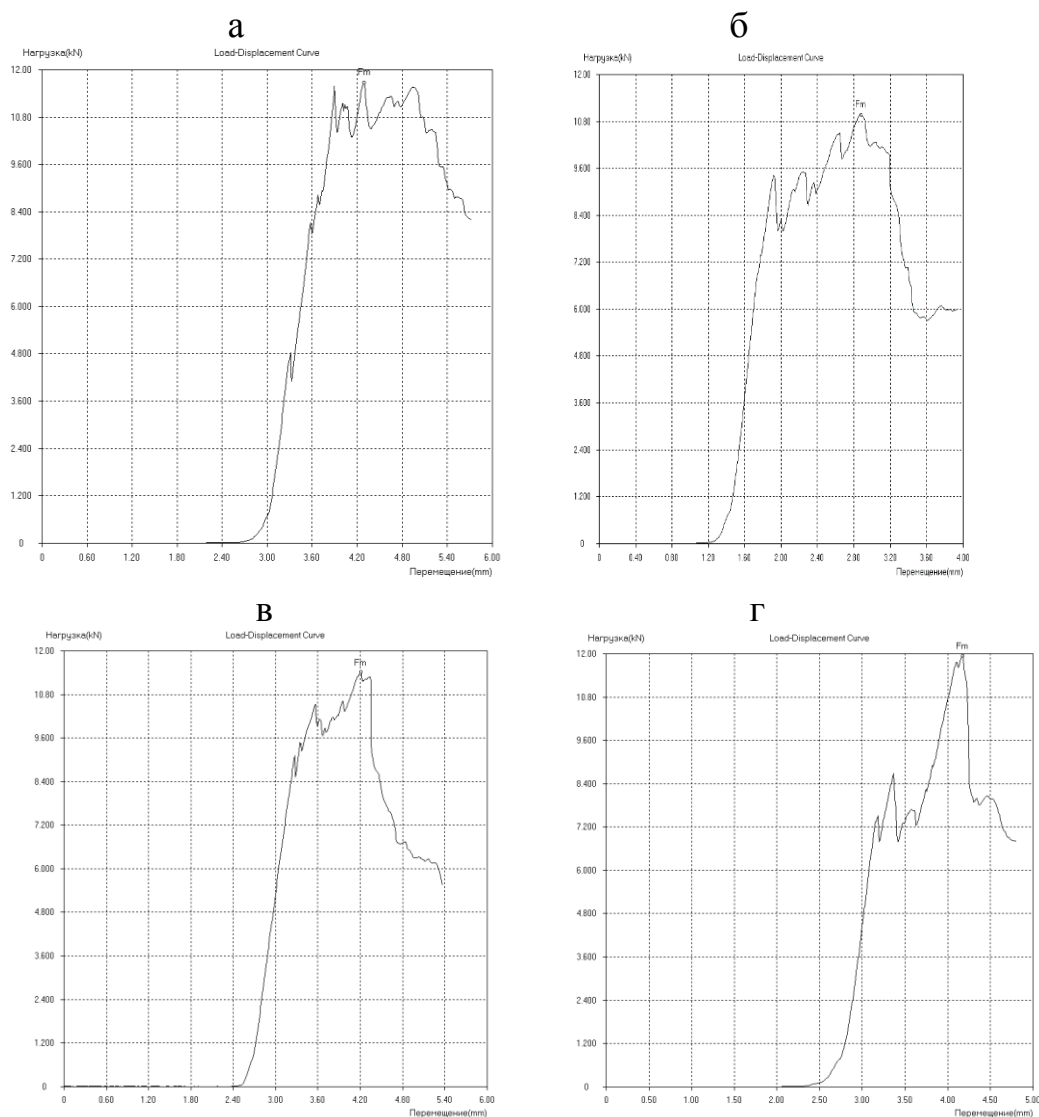


Рисунок 3.3 – Графические зависимости «нагрузка (F) – продольные деформации ( $\ell$ )» как результат процесса нагружения образцов серии 1: а – образца номер 1; б – образца номер 2; в – образца номер 3; г – образца номер 4. Состав образцов: водоцементное отношение В/Ц=0,5; соотношение масс наполнителя из конвертерного шлака и цемента –  $m_n / m_{ц} = 0,1$  с водой, активированной локальным магнитным полем с индукцией  $B=0,378$  мТл (при силе тока в катушке электромагнита  $I=0,5$  А и времени воздействия 20 с)

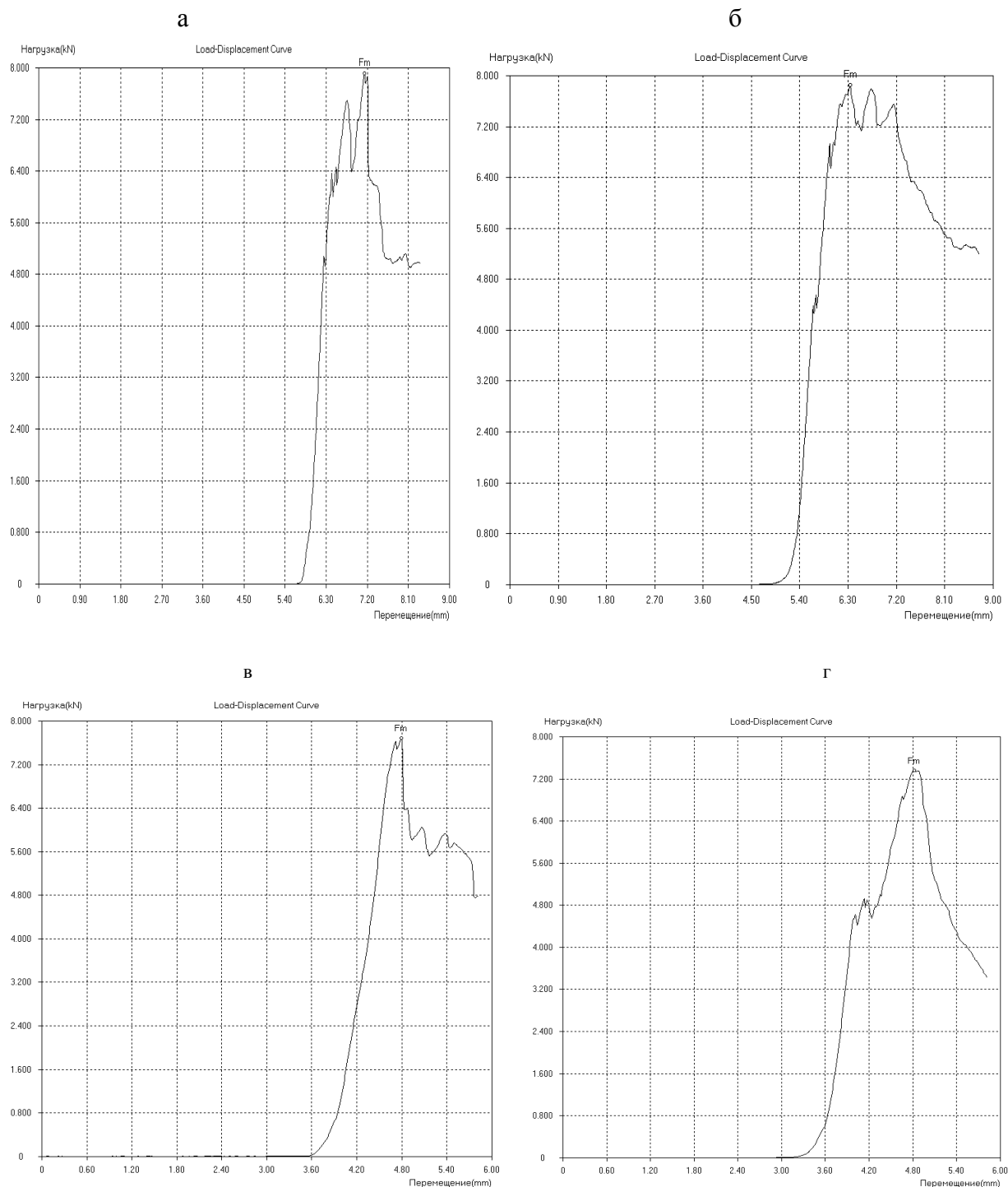
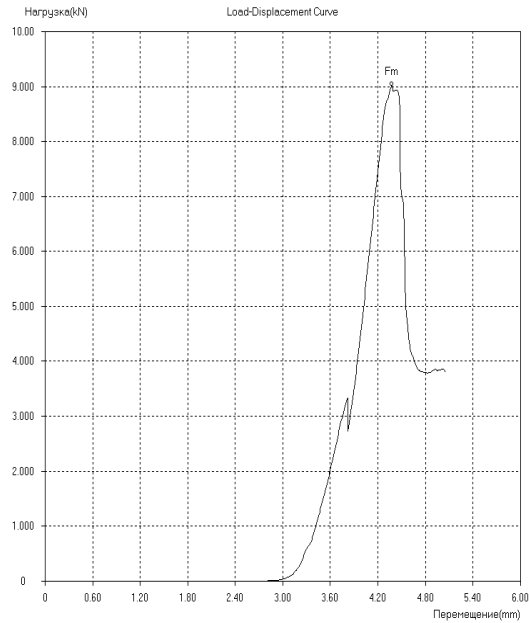
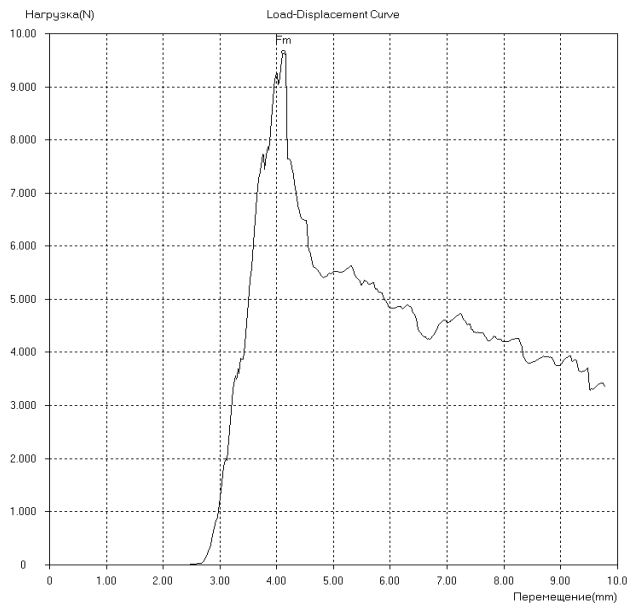


Рисунок 3.4 – Графические зависимости «нагрузка ( $F$ ) – продольные деформации ( $\ell$ )» как результат процесса нагружения образцов серии 2: а – образца номер 5; б – образца номер 6; в – образца номер 7; г – образца номер 8. Состав образцов: водоцементное отношение  $B/C=0,75$ ; соотношение масс наполнителя из конвертерного шлака и цемента –  $m_n / m_c = 0,1$  с водой, активированной локальным магнитным полем с индукцией  $B=0,378$  мТл (при силе тока в катушке электромагнита  $I=0,5$  А и времени воздействия 20 с)

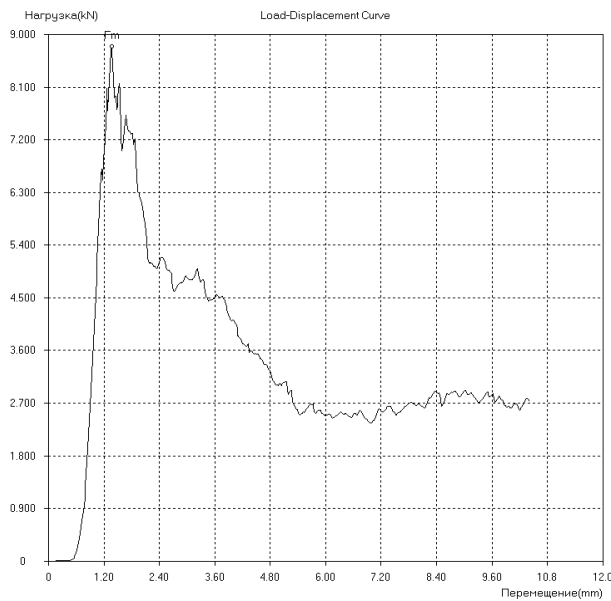
а



б



в



г

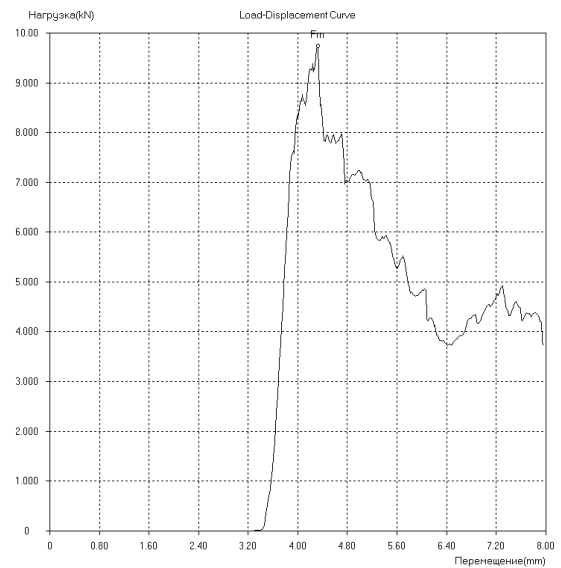


Рисунок 3.5 – Графические зависимости «нагрузка (F) – продольные деформации ( $\ell$ )» как результат процесса нагружения образцов серии 3: а – образца номер 9; б – образца номер 10; в – образца номер 11; г – образца номер 12. Состав образцов: водоцементное отношение В/Ц=0,5; соотношение масс наполнителя из конвертерного шлака и цемента –  $m_n / m_{ц} = 0,2$  с водой, активированной локальным магнитным полем с индукцией  $B=0,378$  мТл (при силе тока в катушке электромагнита  $I=0,5$  А и времени воздействия 20 с)

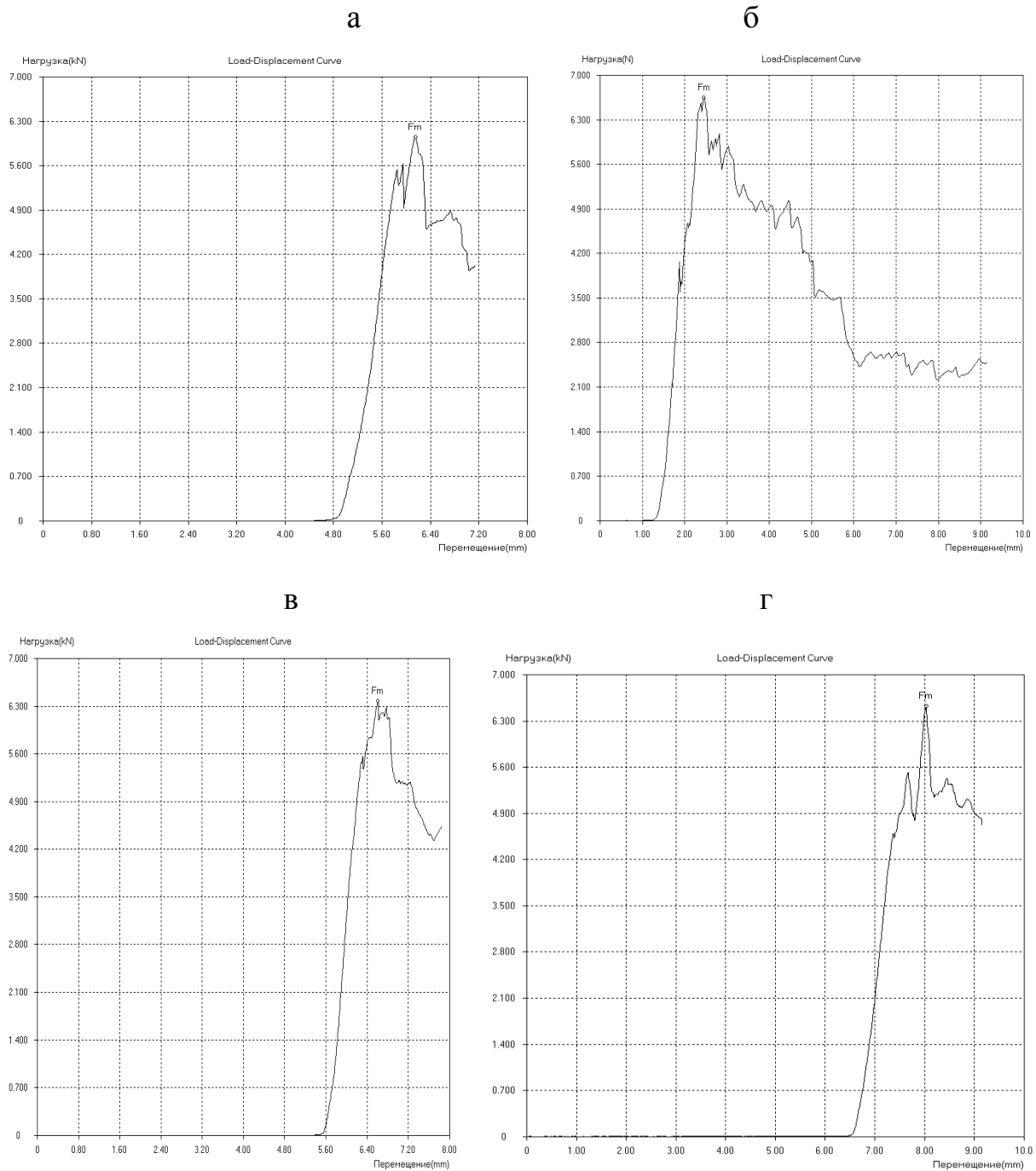


Рисунок 3.6 – Графические зависимости «нагрузка (F) – продольные деформации ( $\ell$ )» как результат процесса нагружения образцов серии 4: а – образца номер 13; б – образца номер 14; в – образца номер 15; г – образца номер 16. Состав образцов: водоцементное отношение В/Ц=0,75; соотношение масс наполнителя из конвертерного шлака и цемента –  $m_n / m_{ц} = 0,2$  с водой, активированной локальным магнитным полем с индукцией  $B=0,378$  мТл (при силе тока в катушке электромагнита  $I=0,5$  А и времени воздействия 20 с)

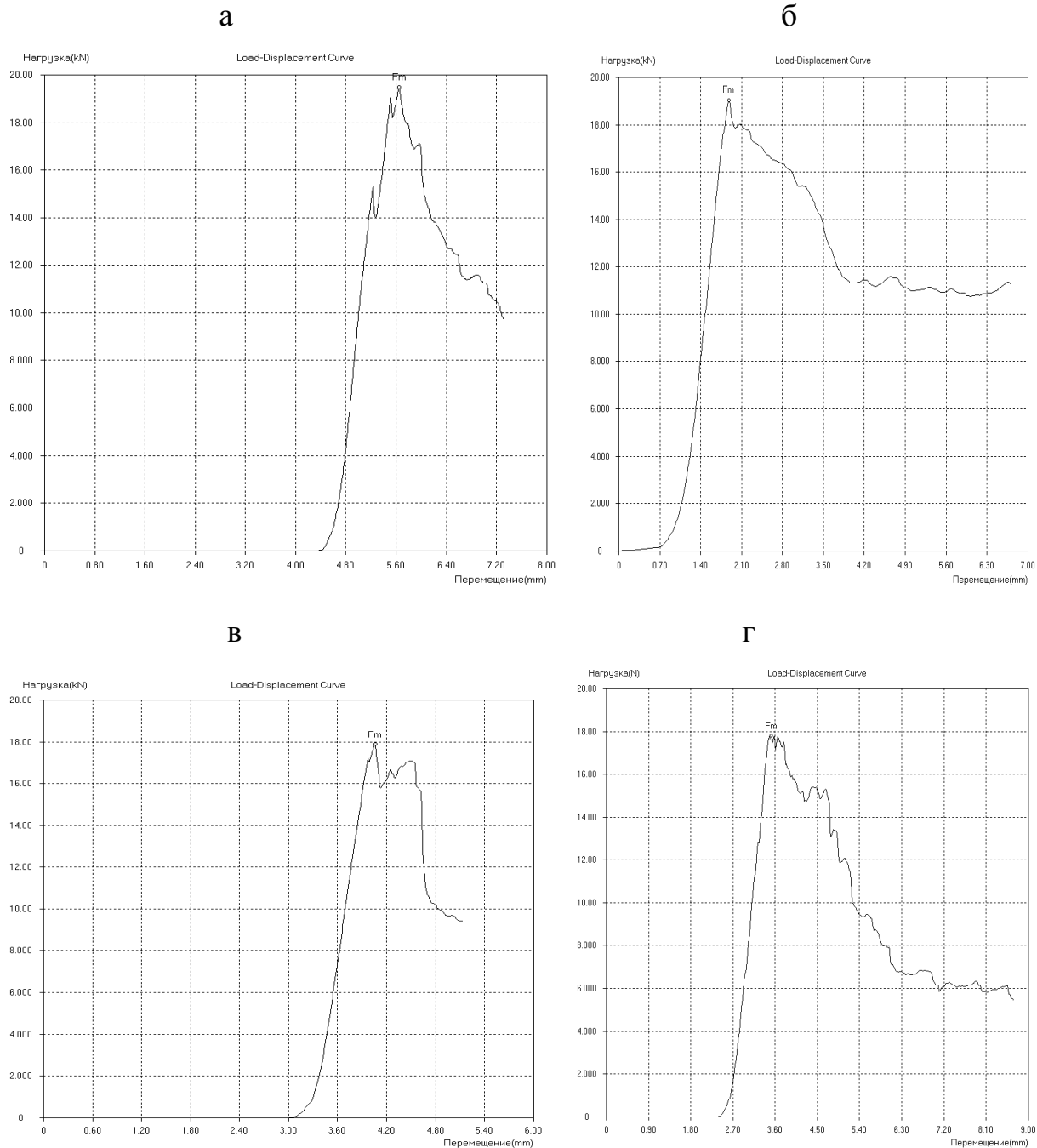


Рисунок 3.7 – Графические зависимости «нагрузка (F) – продольные деформации ( $\ell$ )» как результат процесса нагружения образцов серии 5: а – образца номер 17; б – образца номер 18; в – образца номер 19; г – образца номер 20. Состав образцов: водоцементное отношение В/Ц=0,5; соотношение масс наполнителя из конвертерного шлака и цемента –  $m_n / m_{ц} = 0,1$  с водой, активированной локальным магнитным полем с индукцией  $B=0,378$  мТл (при силе тока в катушке электромагнита  $I=0,5$  А и времени воздействия 60 с)



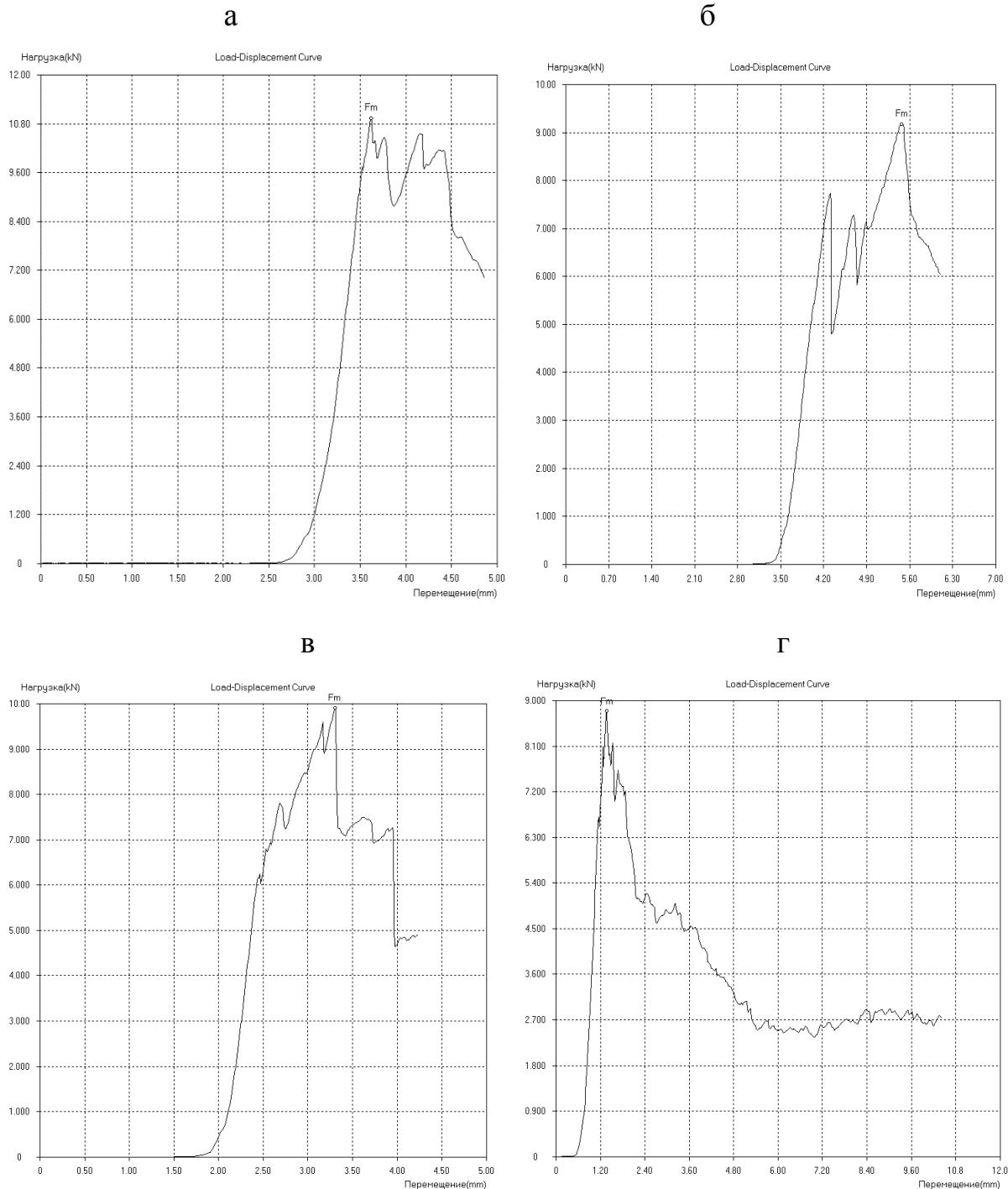


Рисунок 3.8 – Графические зависимости «нагрузка (F) – продольные деформации ( $\ell$ )» как результат процесса нагружения образцов серии 6: а – образца номер 21; б – образца номер 22; в – образца номер 23; г – образца номер 24. Состав образцов: водоцементное отношение В/Ц=0,75; соотношение масс наполнителя из конвертерного шлака и цемента –  $m_n / m_{ц} = 0,1$  с водой, активированной локальным магнитным полем с индукцией  $B=0,378$  мТл (при силе тока в катушке электромагнита  $I=0,5$  А и времени воздействия 60 с)

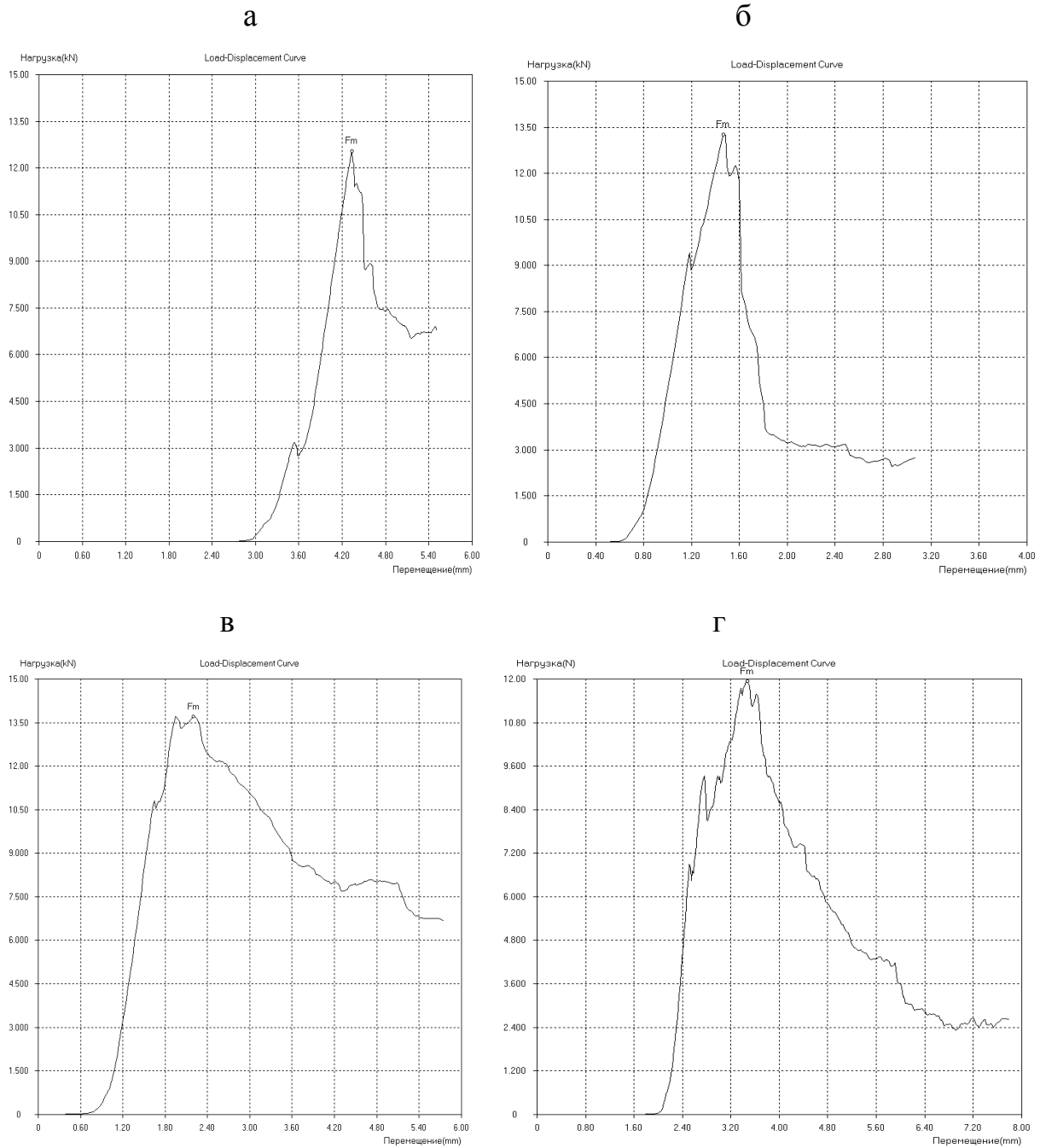


Рисунок 3.9 – Графические зависимости «нагрузка (F) – продольные деформации ( $\ell$ )» как результат процесса нагружения образцов серии 7: а – образца номер 25; б – образца номер 26; в – образца номер 27; г – образца номер 28. Состав образцов: водоцементное отношение В/Ц=0,5; соотношение масс наполнителя из конвертерного шлака и цемента –  $m_n / m_{ц} = 0,2$  с водой, активированной локальным магнитным полем с индукцией  $B=0,378$  мТл (при силе тока в катушке электромагнита  $I=0,5$  А и времени воздействия 60 с)

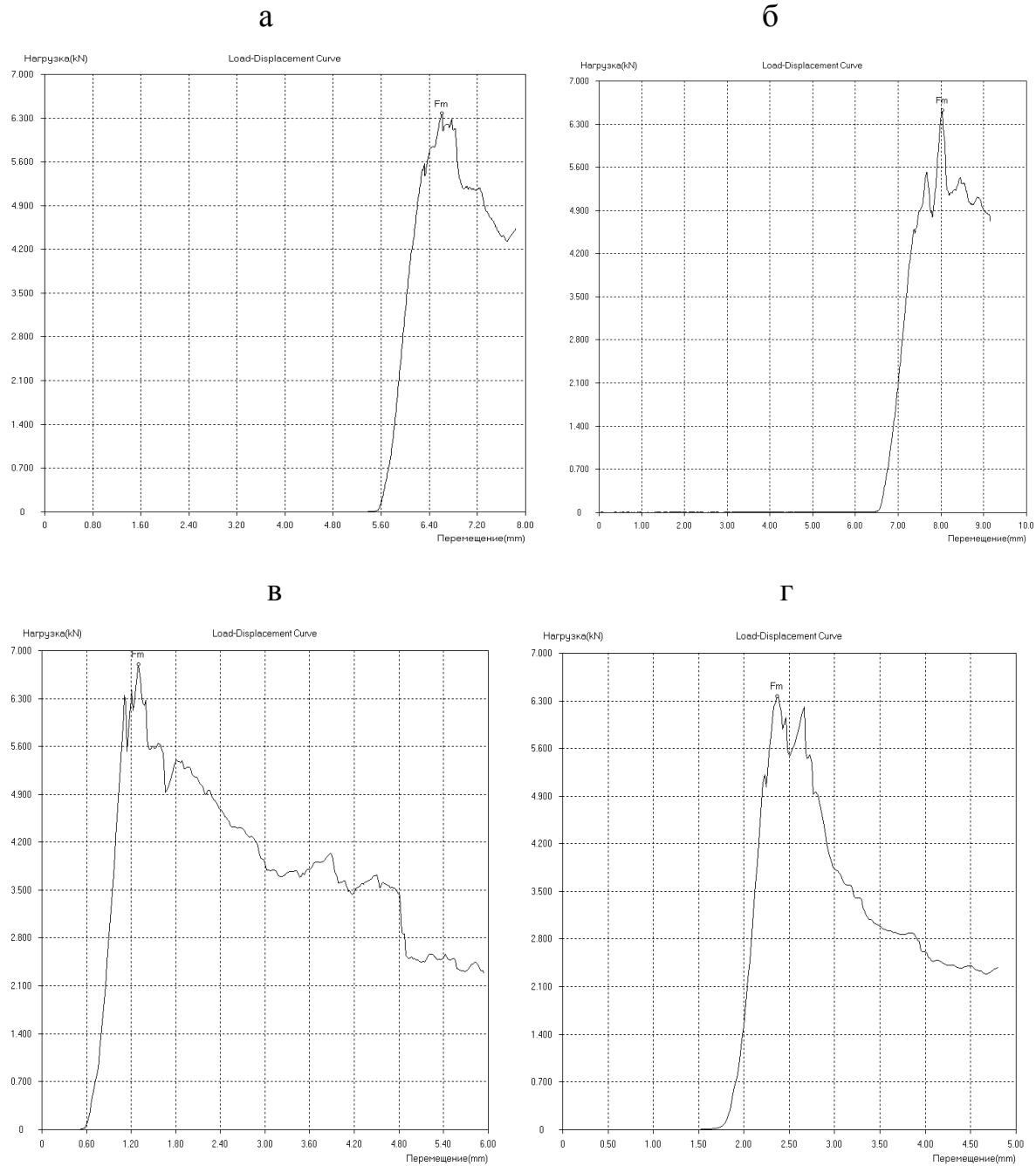


Рисунок 3.10 – Графические зависимости «нагрузка (F) – продольные деформации ( $\ell$ )» как результат процесса нагружения образцов серии 8: а – образца номер 29; б – образца номер 30; в – образца номер 31; г – образца номер 32. Состав образцов: водоцементное отношение В/Ц=0,75; соотношение масс наполнителя из конвертерного шлака и цемента –  $m_n / m_{ц} = 0,2$  с водой, активированной локальным магнитным полем с индукцией  $B=0,378$  мТл (при силе тока в катушке электромагнита  $I=0,5$  А и времени воздействия 60 с)

Таблица 3.1 – Результаты оценки прочностных, упругих и адгезионных свойств образцов ЦКИМ с наполнителем из шлака (площадь поперечного сечения образца A=706 мм, диаметр образца d=30 мм, индукция магнитного поля для активация воды B=0,378 мТл)

Номер		Состав ЦКИМ (масса, г)			Соотношение масс		Параметры воздей- ствия активации воды ЦКИМ			На- грузка, кН	Прочность на сжатие, R <sub>c</sub> , МПа		Модуль упру- гости, E, МПа		Величина сцепления ЦКИМ с металлом, τ, кПа	
се- рии	об- раз- ца	вода	це- мент	напол- нитель	воды и це- мента, В/Ц	наполни- теля и це- мента, m <sub>н</sub> /m <sub>ц</sub>	сила тока , I,А	вре- мя, t,с	им- пульс тока, It, А·с	i-го образ- ца	i-го образ- ца	сред- ние зна- чения	i-го образ- ца	сред- ние зна- чения		
1	1	150	300	30	0,50	0,10	0,50	20	10	11,690	16,56	16,31	847,06	962,8	86,83	
	2									10,980	15,55		1121,70			
	3									11,420	16,18		875,57			
	4									11,960	16,94		1006,74			
2	5		200	20	0,75					0,20	7,915	11,21	10,92	697,87	634,3	57,53
	6										7,855	11,13		745,19		
	7										7,690	10,89		539,11		
	8										7,370	10,44		603,19		
3	9		300	60	0,50	0,20				9,060	12,83	13,20	712,61	849,4	69,68	
	10									9,660	13,68		726,09			
	11									8,795	12,46		829,47			
	12									9,750	13,81		1129,41			
4	13		200	40	0,75	0,20				6,060	8,58	9,08	355,30	419,3	66,05	
	14									6,670	9,45		520,00			
	15									6,380	9,04		452,02			
	16									6,535	9,26		349,73			

Окончание таблицы 3.1

Номер		Состав ЦКИМ (масса, г)			Соотношение масс		Параметры воздей- ствия активации во- ды ЦКИМ			На- грузка, кН	Прочность на сжатие, R <sub>c</sub> , МПа		Модуль упру- гости, E, МПа		Величина сцепления ЦКИМ с металлом, τ, кПа	
се- рии	об- раз- ца	вода	це- мент	напол- нитель	воды и це- мента, В/Ц	наполни- теля и це- мента, m <sub>н</sub> /m <sub>ц</sub>	сила тока , I, А	вре- мя, t, с	им- пульс тока, It, А·с	i-го образ- ца	i-го образ- ца	сред- ние зна- чения	i-го образ- ца	сред- ние значе- ния		
5	17	150	300	30	0,50	0,10	0,50	60	30	19,490	27,60	26,30	1540,38	1403,3	140,34	
	18									19,050	26,98		1288,30			
	19									17,920	25,38		1563,50			
	20									17,830	25,25		1220,88			
6	21		200	20	0,75					0,20	10,940	15,50	13,75	761,62	749,7	73,01
	22										9,180	13,00		637,59		
	23										9,920	14,05		726,36		
	24										8,795	12,46		873,27		
7	25		300	60	0,50	0,20					12,560	17,79	18,24	875,32	1098,5	96,73
	26										13,270	18,80		1388,89		
	27										13,730	19,45		942,96		
	28										11,950	16,93		1186,96		
8	29		200	40	0,75					6,380	9,04	9,24	506,62	487,3	46,75	
	30									6,535	9,26		439,71			
	31									6,800	9,63		485,56			
	32									6,370	9,02		517,24			

На рисунке 3.11 приведены обобщенные данные, отображенные на рисунках 3.3 – 3.10, характеризующие зависимость прочностных характеристик ЦКИМ с наполнителем из тонкомолотого конвертерного шлака от их составов и параметров активации воды (водных систем) ЦКИМ локальным магнитным полем.

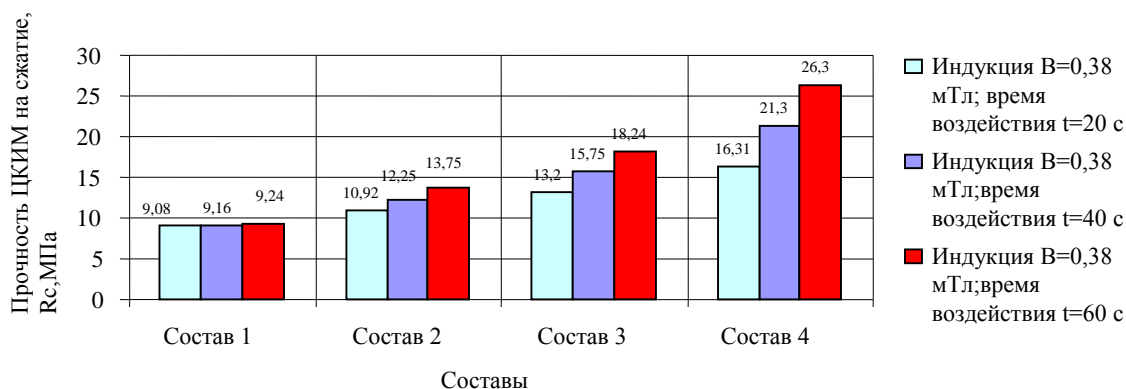


Рисунок 3.11 – Диаграмма, отображающая зависимость прочностных характеристик от составов и параметров активации воды и водных систем ЦКИМ локальным магнитным полем. Составы: 1 – В/Ц: $m_n / m_{ц}=0,75 : 0,2$ ; 2 – В/Ц: $m_n / m_{ц}=0,75 : 0,1$ ; 3 – В/Ц:  $m_n / m_{ц}=0,5 : 0,2$ ; 4 – В/Ц: $m_n / m_{ц}=0,5 : 0,1$

Приведенные на рисунке 3.11 данные позволяют сделать следующие выводы:

- прочностные характеристики исследуемых тампонажных материалов повышаются с уменьшением водоцементного отношения в смесях и увеличением времени воздействия на воду и водные системы ЦКИМ локального магнитного поля;
- отмеченные на диаграмме массовые соотношения воды, цемента, наполнителя и параметры активации воды магнитным полем могут быть основанием для установления факторов и уровней их варьирования при оптимизации составов ЦКИМ методом математического планирования эксперимента [124, 147].

По аналогичной методике исследовались активированные локальным магнитным полем составы ЦКИМ с наполнителем из отходов обработки металлов абразивным инструментом (электрокорундом). Данные приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты оценки прочностных, упругих и адгезионных свойств образцов ЦКИМ с наполнителем из отходов обработки металлов абразивным инструментом (площадь поперечного сечения образца  $A=1140 \text{ мм}^2$ , диаметр образца  $d=38,1 \text{ мм}$ , индукция магнитного поля для активация воды  $B=0,378 \text{ мТл}$ )

Номер		Состав ЦКИМ (масса, г)			Соотношение масс		Параметры воздействия активации воды ЦКИМ			Нагруз- ка, кН	Прочность на сжатие, R <sub>c</sub> , МПа		Модуль упругости, E, МПа		Вели- чина сцепле- ния ЦКИМ с метал- лом, τ, кПа	
се- рии	об- раз- ца	вода	це- мент	напол- нитель	воды и це- мента , В/Ц	напол- ните- ля и це- мента, m <sub>н</sub> /m <sub>ц</sub>	сила тока, I,А	время , t,с	импульс тока, It, А·с	i-го образ- ца	i-го образ- ца	сред- ние зна- чения	i-го образ- ца	сред- ние значе- ния		
1	1	150	300	30	0,50	0,1	0,50	20	10	15,75	13,82	12,92	532,7	649,8	66,77	
	2									13,38	11,74		887,6			
	3									15,08	13,20		529,0			
2	4		200	20	0,75					0,20	8,58	7,53	7,17	502,9	420,2	44,92
	5										7,92	6,95		425,1		
	6										8,01	7,03		332,5		
3	7		300	60	0,50	0,20				12,38	10,87	11,04	635,8	695,8	57,13	
	8									13,99	12,28		667,6			
	9									11,37	9,98		784,0			
4	10		200	40	0,75					5,83	5,12	4,85	416,2	379,13	52,38	
	11									5,325	4,67		254,2			
	12									5,435	4,77		467,0			

Окончание таблицы 3.2

Номер		Состав ЦКИМ (масса, г)			Соотношение масс		Параметры воздей- ствия активации воды ЦКИМ			Нагруз- ка, кН	Прочность на сжатие, R <sub>c</sub> , МПа		Модуль упругости, E, МПа		Вели- чина сцепле- ния ЦКИМ с метал- лом,τ, кПа	
се- рии	об- раз- ца	вода	це- мент	напол- нитель	воды и це- мента, В/Ц	наполни- теля и це- мента, m <sub>н</sub> /m <sub>ц</sub>	сила тока, I,А	время , t,с	им- пульс тока, It, А·с	i-го образ- ца	i-го образ- ца	сред- ние зна- чения	i-го образ- ца	сред- ние зна- чения		
5	13	150	300	30	0,50	0,1	0,50	60	30	18,71	16,42	15,80	581,0	523,8	109,61	
	14									16,21	14,22		467,4			
	15									19,11	16,77		523,0			
6	16		200	20	0,75					0,20	13,23	11,61	11,07	375,4	562,4	58,40
	17										11,96	10,5		753,5		
	18										12,66	11,11		558,3		
7	19		300	60	0,50	0,20				14,02	12,31	14,14	674,9	750,5	78,62	
	20									17,81	15,63		758,6			
	21									16,49	14,47		817,9			
8	22		200	40	0,75	0,20				5,45	4,78	6,01	256,8	340,2	37,36	
	23									8,08	7,09		424,9			
	24									7,02	6,16		338,8			



Результаты данных предварительных экспериментальных исследований, приведенные в таблицах 3.1, 3.2 и на рисунке 3.12, позволяют сделать следующие утверждения:

1. Более высокими прочностными, упругими и адгезионными свойствами обладают ЦКИМ с наполнителем из тонкомолотого конвертерного шлака. Шлаки часто рассматриваются в качестве химически активных искусственных «пород», которые, в отличие от естественных горных пород, обладающих сходным химическим составом, вступают в реакции гидратации и гидролиза из-за наличия в их составе силикатов и алюминатов кальция [13, 202].

По данным качественного и количественного рентгенофазового анализа в сталеплавильных шлаках всех фракций содержатся основные фазы, мас. %: ларнит -  $\beta$ -  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  (24,07 - 37,0); оксид кальция  $\text{CaO}$  (2,6 - 5,0); гидроксид кальция  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (20,0 - 24,0); вюстит  $\text{FeO}$  (4,7 - 6,9); графит  $\text{C}$  (6,0 - 6,2) и майенит  $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$  (18,0 - 41,0).

Таким образом, синтез цементных инъекционных систем твердения с применением в качестве ферромагнитного наполнителя конвертерных шлаков, отличающихся оптимальной прочностью и другими строительно-техническими свойствами, может быть объяснен и потенциальной активностью шлаков, особенно проявляющейся при магнитной активации.

2. Для составов ЦКИМ с водоцементными отношениями  $B/C=0,5$  и  $0,75$  оптимальная величина индукции локального магнитного поля для активации воды и водных систем ЦКИМ должна быть равной  $B=0,378$  мТл при силе тока в обмотке катушки электромагнита  $I=0,5$  А и времени воздействия  $t=60$  с (см. результаты испытаний образцов составов 5 и 7 в таблицах 3.1 и 3.2) [201, 41].

3. Результаты испытаний ЦКИМ с наполнителем из отходов обработки металлов абразивным инструментом характеризуются более низкими прочностными и другими физико-механическими характеристиками, а также значительной изменчивостью свойств наполнителя (см. таблицу 3.2). Объяснить этот факт можно следующим образом. В качестве наполнителей для экспериментальных исследований нами применялись отходы обработки стали разной модификации. При обработке

более прочной стали количество частиц металла в отходах уменьшалось с увеличением при этом количества частиц электрокорунда. И, наоборот, в случае обработки стали меньшей прочности металлическая фаза наполнителя из отходов обработки металла абразивными материалами увеличивалась. Сбор отходов обработки металла из разных мест (разных производств) характеризовался неравномерным составом [144, 176]. В результате напрашивается вывод о нецелесообразности использования отходов обработки металлов в качестве ферромагнитного наполнителя ЦКИМ.

В связи с этими выводами дальнейшие экспериментальные исследования по оценке других свойств и оптимизации составов были продолжены с ЦКИМ, наполнителем цементных матриц у которых являлся тонкомолотый конвертерный шлак.

### **3.2 Определение оптимального значения силы тока в обмотке электромагнита устройства активации воды**

Определение оптимального значения силы тока в обмотке электромагнита устройства активации воды и водно-цементных смесей ЦКИМ воздействием локального магнитного поля производилось по пределу прочности на изгиб образцов цементно-песчаного тампонажного композиционного материала состава Ц:П:В: наполнитель из тонкомолотого конвертерного шлака = 1:2:0,48:0,1 [157, 158]. Возраст испытываемых образцов составлял семь суток. Активация исходных материалов производилась в два этапа. Сначала активировалась вода для смесей, затем водно-цементные смеси ЦКИМ. Характеристика и размеры образцов, а также способ нагружения и методика испытания приведены в главе 2. Численные значения времени активации были: 1, 2 и 3 минуты [176].

Результаты экспериментальных исследований отображены на рисунке 3.12.

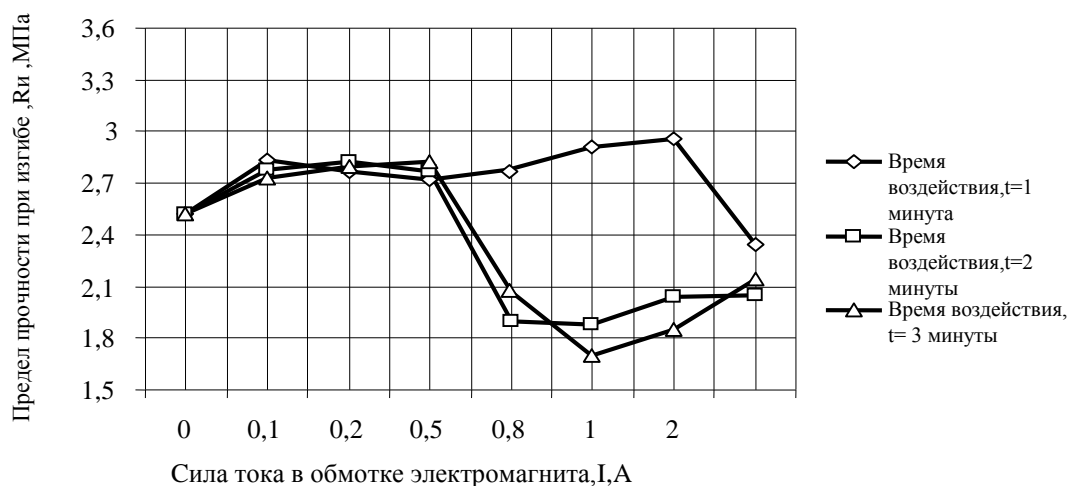


Рисунок 3.12 – Графические зависимости «сила тока – прочность ЦКИМ на изгиб»

Приведенные на рисунке 3.12 данные позволяют сделать следующие утверждения:

- время воздействия магнитного поля на воду не должно быть более 1 минуты;
- целесообразная сила тока в электромагните устройства активации должна быть в пределах  $I=0,1-0,5$  или 1 А.

### 3.3 Оценка значимости двухэтапной магнитной обработки воды и водных систем смесей ЦКИМ

Оценка значимости двухэтапной магнитной обработки воды и водных систем смесей ЦКИМ производилась на образцах, изготовленных из цементно-водных смесей, по пределу их прочности на сжатие. Для испытаний был принят следующий состав образцов: Ц:В:наполнитель (конвертерный шлак)=1:0,5:0,1.

Изучение плотности упаковки частиц проводилось для конвертерных шлаков с удельной поверхностью 300, 400, 500 м<sup>2</sup>/кг (по ПСХ). Эти величины дисперсности приняты для исследования в связи с тем, что они вполне достижимы в процессе дополнительного измельчения и экономически обоснованы. Кроме этого указанный диапазон удельных площадей поверхности удовлетворяет рекомендуемым дисперсностям частиц вяжущего для получения различных систем твердения.

Распределение размеров частиц при оптимальной степени дисперсности получено в результате применения метода лазерной гранулометрии (рисунок 3.15). Знание распределения частиц по размерам важно для понимания физических и химических свойств материала. Размер частиц влияет на реакционную способность твердых тел, участвующих в химических реакциях. В результате гранулометрического анализа в общем случае измеряется не размер частиц, а распределение по размерам частиц в пробе. На практике используют дифференциальную и интегральную форму представления распределений. В первом случае, распределение представляется в виде гистограммы, в которой высота столбика соответствует доле фракции с размером частиц, лежащем в некотором интервале от  $d$  до  $d+\Delta$ . Во втором случае, распределение описывается графиком, в котором по оси  $X$  откладывается размер частиц  $d$ , а по оси  $Y$  доля частиц с размером менее  $d$ .

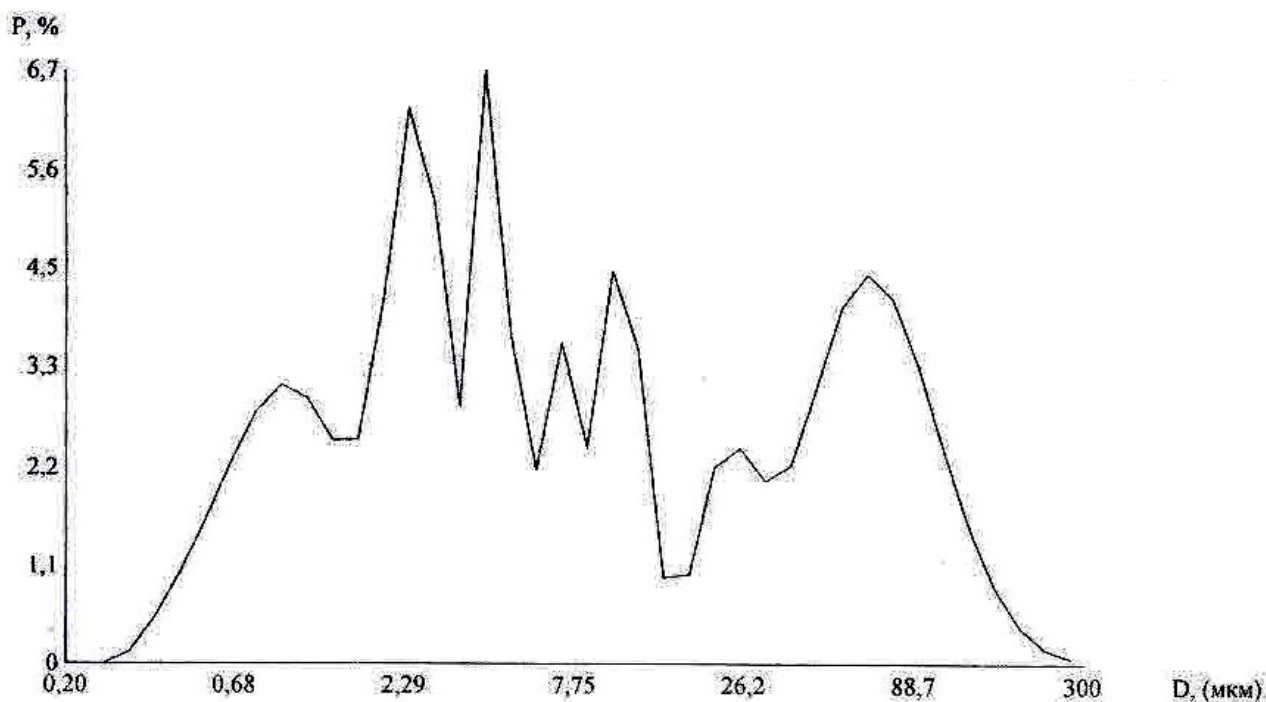


Рисунок 3.13 – Гранулометрический состав конвертерных шлаков с удельной поверхностью  $300 \text{ м}^2/\text{кг}$  (по ПСХ)

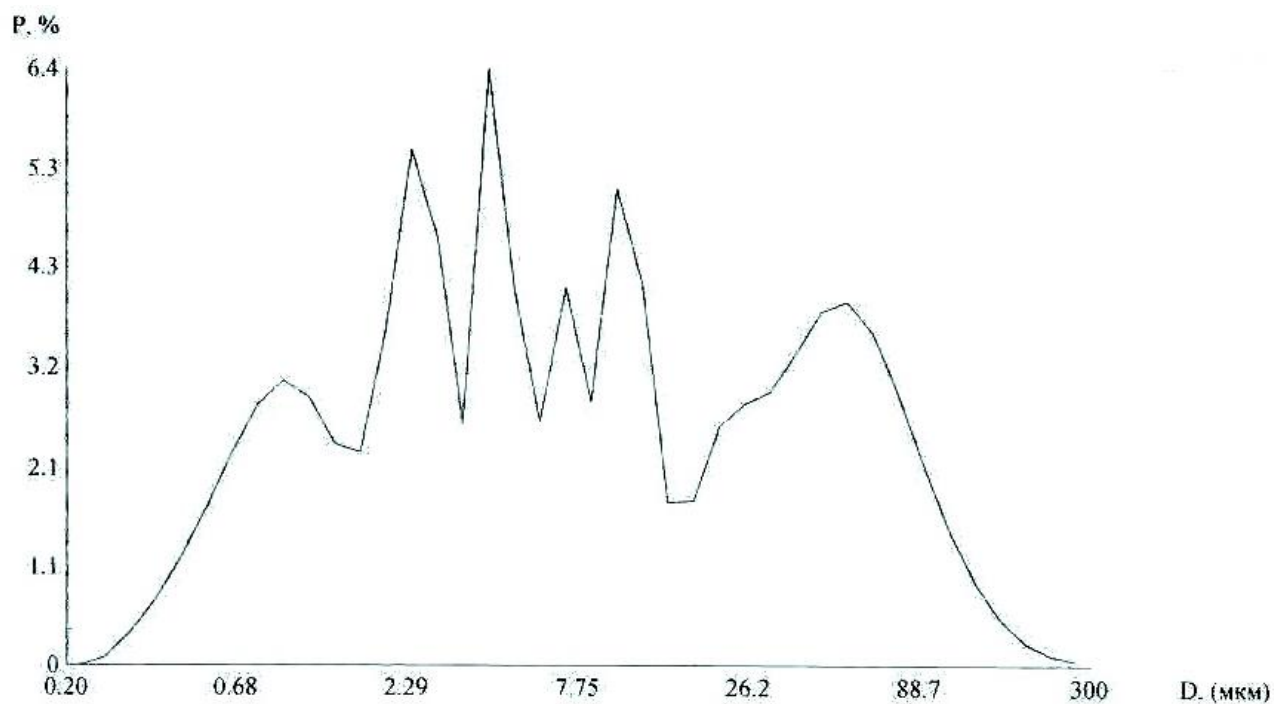


Рисунок 3.14 – Гранулометрический состав конвертерных шлаков с удельной поверхностью 400 м²/кг (по ПСХ)

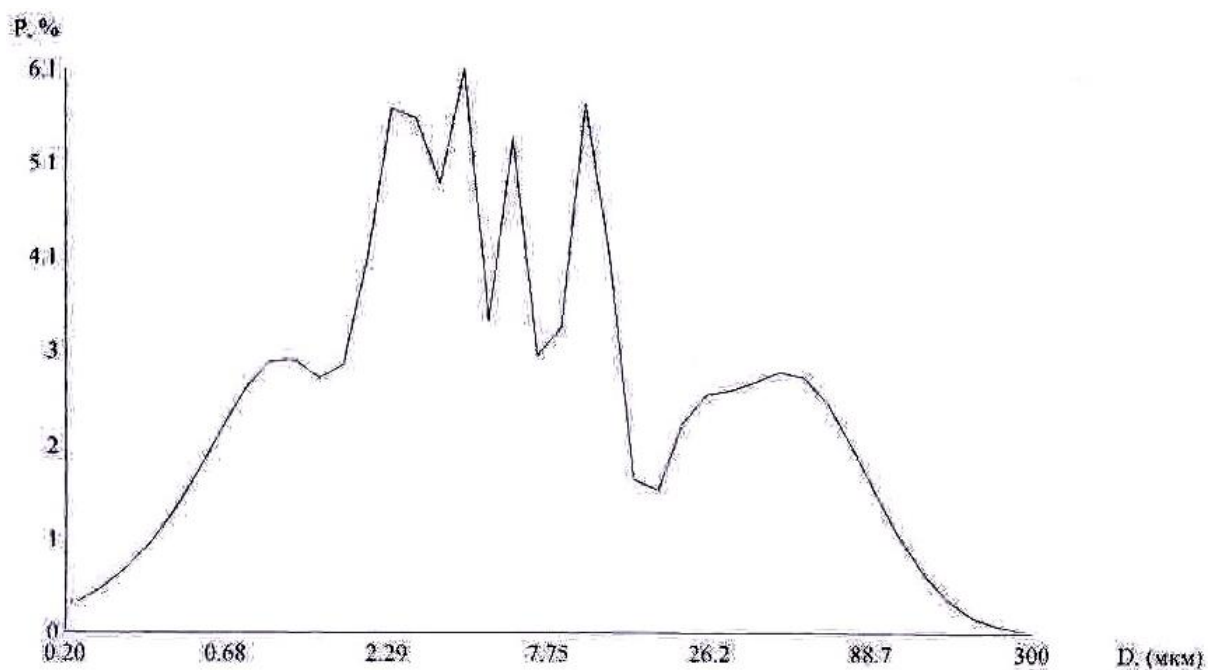


Рисунок 3.15 - Гранулометрический состав конвертерных шлаков с удельной поверхностью 500 м²/кг (по ПСХ)

Время магнитной обработки воды, а затем водных систем смесей, составляло 60 с силой тока в обмотке катушки электромагнита  $I=0,5$  А (при расчетной величине индукции магнитного поля в полости катушки  $B=0,378$  мТл) [124, 125, 138, 200]. Данные результатов оценки двухэтапной магнитной обработки воды и водных систем смесей приведены на рисунке 3.16.

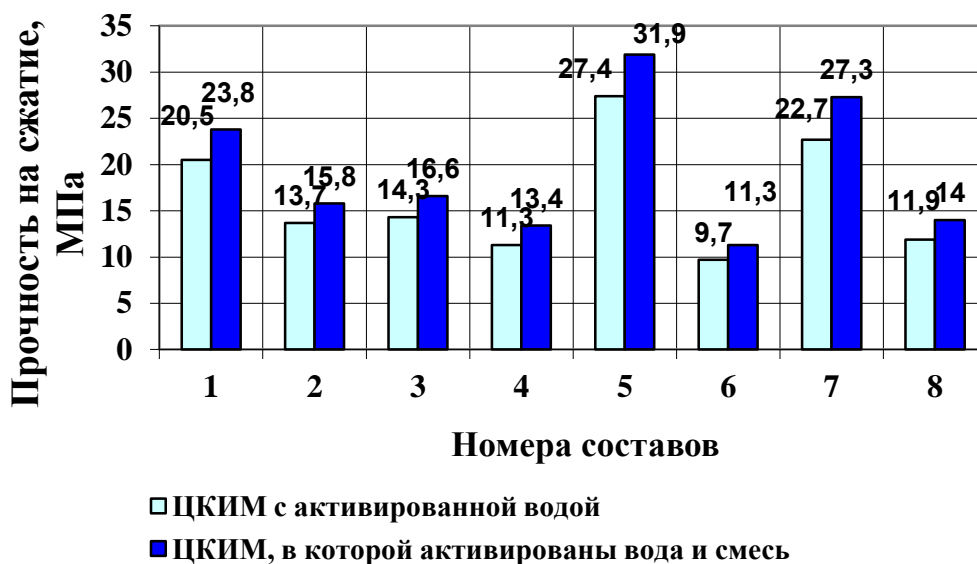


Рисунок 3.16 – Результаты двухэтапной магнитной обработки водных систем ЦКИМ

Согласно данным, приведенным на рисунке 3.16, прирост прочности для ЦКИМ, прошедших двухэтапную магнитную обработку: сначала воды, а затем смесей составил 15–20 %.

Твердофазная активация изучена и разработана достаточно широко, в то время как жидкофазная активация является сравнительно новым и малоизученным направлением и имеет ряд особенностей, связанных с надмолекулярной структурой воды. В то же время активация воды и водных систем требует меньших затрат энергии по сравнению с активацией твердой фазы, что позволяет применять ее в производстве строительных материалов, в частности, мелкозернистых бетонов.

Возможность активации воды и водных систем (растворов, суспензий, дисперсий) основана на особом строении молекул воды, на их способности образовывать надмолекулярные структуры.

## **4 ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВОВ И ОЦЕНКА СТРОИТЕЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ИНЪЕКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Для оптимизации составов ЦКИМ по прочностным характеристикам был проведен полный факторный эксперимент типа  $N=2^3$ , где  $N$  – число опытов, 2 – число уровней варьирования факторов и 3 – число независимых переменных по методикам, рекомендуемым в литературных источниках [114,4,71,174,139,140].

За основу математического планирования эксперимента была принята методика С.В. Носова [114].

Пилотные экспериментальные исследования по оценке свойств цементных композиций (ЦКИМ) и анализ их результатов позволил определить нижние и верхние уровни изменения независимых факторов планируемого эксперимента.

Планирование эксперимента основывалось на том, что в пределах изменения уровней варьирования модель будет иметь вид однородного линейного уравнения:

$$Y(R)=B_0+\sum_{i=1}^n B_i X_i,$$

где  $Y(R)$  – функция отклика ( $R_c$  – предел прочности материала на сжатие);  $B_0$ ,  $B_i$  – коэффициенты уравнения регрессии;  $X_i$  – факторы.

### **4.1 Результаты планирования эксперимента по оптимизации составов цементно-песчаных ЦКИМ для заделки широких трещин**

Оптимизация составов цементно-песчаных композиционных инъекционных материалов (ЦКИМ) для заделки трещин в железобетонных конструкциях с шириной раскрытия 1–10 мм осуществлялась планом эксперимента типа  $2^3$  с дополнительными точками по среднему уровню варьирования.

В качестве факторов переменных были приняты:  $X_1$  – соотношение масс пластификатора и цемента,  $\frac{m_{c-3}}{m_y}$ ;  $X_2$  – импульс тока в катушке электромагнита ( $I \cdot t, A \cdot c$ );  $X_3$  – соотношение масс песка и цемента,  $\frac{m_n}{m_y}$

Уровни варьирования принятых факторов приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Уровни и факторы, влияющие на свойства ЦКИМ

Уровни варьирования факторов	Переменные величины		
	$X_1$	$X_2$	$X_3$
Нижний [-1]	0,0026	10	1,665
Средний [0]	0,0052	20	1,832
Верхний [+1]	0,0078	30	2
Интервалы варьирования	0,0026	10	0,167

Матрица планирования и результаты эксперимента приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – План и результаты экспериментальных исследований

Номер серии опытов	Факторы (кодированные)						Параметры оптимизации $Y_i$ ; $Y_u$ (Прочность ЦТК на сжатие, $R_c$ , Мпа)				$\bar{Y}$ ( $R_{cp}$ )	$S^2_y = \frac{\sum_{u=1}^N (\bar{Y} - Y_{ij})^2}{k-1}$
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1$ $X_2$	$X_1$ $X_3$	$X_2$ $X_3$	$Y_{i1}$ ( $R_1$ )	$Y_{i2}$ ( $R_2$ )	$Y_{i3}$ ( $R_3$ )	$Y_{i4}$ ( $R_4$ )		
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	17,20	19,00	20,10	18,30	18,65	1,4833
2	-1	+1	+1	-1	-1	+1	53,40	54,00	55,20	55,30	<b>54,48</b>	0,8625
3	+1	-1	+1	-1	+1	-1	16,60	18,30	20,00	18,70	18,40	1,9667
4	-1	-1	+1	+1	-1	-1	43,40	39,80	39,20	36,75	39,79	7,5406
5	+1	+1	-1	+1	-1	-1	26,50	28,20	26,98	26,00	26,92	0,2221
6	-1	+1	-1	-1	+1	-1	42,90	46,00	47,20	50,20	46,57	<b>9,0427</b>
7	+1	-1	-1	-1	-1	+1	20,24	18,40	19,00	20,80	19,61	1,2164
8	-1	-1	-1	+1	+1	+1	48,45	50,90	52,10	47,10	49,64	5,1690
9	0	0	0	0	0	0	41,32	41,34	41,36	41,40	41,36	
$\Sigma$												<b>25,50</b>

За отклик для оптимизации составов и параметров магнитной обработки смесей ЦКИМ был принят предел прочности материалов на сжатие при максимальных напряжениях в процессе разрушения образцов.



Расчет коэффициентов регрессии и оценка их значимости приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Расчет коэффициентов регрессии и оценка их значимости по критерию Стьюдента

N серий экспериментов	X <sub>0</sub>	Y <sub>ui</sub>		1. Определение численного значения коэффициента b <sub>0</sub> и оценка его значимости
		+	-	
1	+1	18,65	-	$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^N X_{iu} \bar{Y}_u}{N} = \frac{274,06}{8} = 34,26; S^2_{\bar{y}} = \frac{\sum_{u=1}^N S^2_u}{N \cdot k} = 274,06^2 : 32 = 2347,2$ <p>Так как <math>b_0 = 34,26 &gt; \Delta b_0 = \pm t \sqrt{\frac{S^2_{\bar{y}}}{N}} = 1,7109 \cdot \sqrt{\frac{2347,2}{8}} = 1,7109 \cdot 17,13 = 29,3</math>.</p> <p>коэффициент b<sub>0</sub> значимый</p>
2	+1	54,48	-	
3	+1	18,40	-	
4	+1	39,79	-	
5	+1	26,92	-	
6	+1	46,57	-	
7	+1	19,61	-	
8	+1	49,64	-	
		274,06		
N серий экспериментов	X	Y <sub>ui</sub>		2. Определение численного значения коэффициента b <sub>1</sub> и оценка его значимости
		+	-	
1	+1	18,65		$b_1 = \frac{\sum_{u=1}^N X_{iu} \bar{Y}_u}{N} = -\frac{106,9}{8} = -13,36; S^2_{\bar{y}} = \frac{\sum_{u=1}^N S^2_u}{N \cdot k} = 106,9^2 : 32 = 357,1$ <p>Так как <math>b_1 = 13,36 &gt; \Delta b_1 = \pm t \sqrt{\frac{S^2_{\bar{y}}}{N}} = 1,7109 \cdot \sqrt{\frac{357,1}{8}} = 1,7109 \cdot 6,68 = 11,43</math>.</p> <p>коэффициент при b<sub>1</sub> значимый</p>
2	-1		54,48	
3	+1	18,40		
4	-1		39,79	
5	+1	26,92		
6	-1		46,57	
7	+1	19,61		
8	-1		49,64	
		83,58 – 190,48 = -106,9		
N серий экспериментов	X	Y <sub>ui</sub>		3. Определение численного значения коэффициента b <sub>2</sub> и оценка его значимости
		+	-	
1	+1	18,65		$b_2 = \frac{\sum_{u=1}^N X_{iu} \bar{Y}_u}{N} = \frac{19,18}{8} = 2,4; S^2_{\bar{y}} = \frac{\sum_{u=1}^N S^2_u}{N \cdot k} = 19,18^2 : 32 = 11,5$ <p>Так как <math>b_2 = 2,4 &gt; \Delta b_2 = \pm t \sqrt{\frac{S^2_{\bar{y}}}{N}} = 1,7109 \cdot \sqrt{\frac{11,5}{8}} = 1,7109 \cdot 1,2 = 2,05</math>.</p> <p>Коэффициент b<sub>2</sub> значимый</p>
2	+1	54,48		
3	-1		18,40	
4	-1		39,79	
5	+1	26,92		
6	+1	46,57		
7	-1		19,61	
8	-1		49,64	
		146,62 – 127,44 = 19,18		

Продолжение таблицы 4.3

N серий экспериментов	X <sub>3</sub>	Y <sub>ui</sub>		<b>4.Определение численного значения коэффициента b<sub>3</sub> и оценка его значимости</b>
		+	-	
1	+1	18,65	-	$b_3 = \frac{\sum_{u=1}^N X_{iu} \bar{Y}_u}{N} = \frac{-11,42}{8} = -1,43; S^2_{\bar{y}} = \frac{\sum_{u=1}^N S^2_u}{N \cdot k} = \frac{(-11,42)^2}{32} = 4,07.$ <p>Так как <math>b_3 = 1,43 &lt; \Delta b_3 = \pm t \sqrt{\frac{S^2_{\bar{y}}}{N}} = 1,7109 \cdot \sqrt{\frac{4,07}{8}} = 1,7109 \cdot 0,71 = 1,21.</math> коэффициент b<sub>3</sub> значимый</p>
2	+1	54,48	-	
3	+1	18,40	-	
4	+1	39,79	-	
5	-1	-	26,92	
6	-1	-	46,57	
7	-1	-	19,61	
8	-1	-	49,64	
131,32-142,74= - 11,42				
N серий экспериментов	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	Y <sub>ui</sub>		<b>5. Определение численного значения коэффициента b<sub>4</sub> и оценка его значимости</b>
		+	-	
1	+1	18,65		$b_4 = \frac{\sum_{u=1}^N X_{iu} \bar{Y}_u}{N} = \frac{-4,06}{8} = -0,51; S^2_{\bar{y}} = \frac{\sum_{u=1}^N S^2_u}{N \cdot k} = \frac{(-4,06)^2}{32} = 0,515$ <p>Так как <math>b_4 = 0,51 &gt; \Delta b_4 = \pm t \sqrt{\frac{S^2_{\bar{y}}}{N}} = 1,7109 \cdot \sqrt{\frac{0,515}{8}} = 1,7109 \cdot 0,254 = 0,43.</math> коэффициент при b<sub>4</sub> значимый</p>
2	-1		54,48	
3	-1		18,40	
4	+1	39,79		
5	+1	26,92		
6	-1		46,57	
7	-1		19,61	
8	+1	49,64		
135,00 -139,06= - 4,06				
N серий экспериментов	X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	Y <sub>ui</sub>		<b>6.Определение коэффициента b<sub>2</sub> при X<sub>2</sub> и оценка его значимости</b>
		+	-	
1	+1	18,65		$b_5 = \frac{\sum_{u=1}^N X_{iu} \bar{Y}_u}{N} = \frac{-7,54}{8} = -0,94; S^2_{\bar{y}} = \frac{\sum_{u=1}^N S^2_u}{N \cdot k} = \frac{(-7,54)^2}{32} = 1,777$ <p>Так как <math>b_5 = 0,94 &gt; \Delta b_2 = \pm t \sqrt{\frac{S^2_{\bar{y}}}{N}} = 1,7109 \cdot \sqrt{\frac{1,777}{8}} = 1,7109 \cdot 0,47 = 0,80.</math> коэффициент b<sub>5</sub> значимый</p>
2	-1		54,48	
3	+1	18,40		
4	-1		39,79	
5	-1		26,92	
6	+1	46,57		
7	-1		19,61	
8	+1	49,64		
133,26 -140,80 = - 7,54				

## Окончание таблицы 4.3

N серий экспери- ментов	X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	Y <sub>ui</sub>		7.Определение коэффициента b <sub>2</sub> при X <sub>2</sub> и оценка его значимости
		+	-	
1	+1	18,65		$b_6 = \frac{\sum_{u=1}^N X_{iu} \bar{Y}_u}{N} = \frac{10,7}{8} = 1,34; \quad S^2_{\bar{y}} = \frac{\sum_{u=1}^N S^2_u}{N \cdot k} = 10,7^2 : 32 = 3,58;$ <p>Так как</p> $b_6 = 1,34 > \Delta b_2 = \pm t \sqrt{\frac{S^2_{\bar{y}}}{N}} = 1,7109 \cdot \sqrt{\frac{3,58}{8}} = 1,7109 \cdot 0,67 = 1,15.$ <p>коэффициент b<sub>6</sub> значимый</p>
2	+1	54,48		
3	-1		18,40	
4	-1		39,79	
5	-1		26,92	
6	-1		46,57	
7	+1	19,61		
8	+1	49,64		
142,38 - 131,68 = 10,7				

В соответствии с полученными данными, уравнение регрессии со значимыми коэффициентами при переменных будет иметь вид:

$$\bar{Y}(R_c) = 34,26 - 13,36X_1 + 2,4X_2 - 1,43X_3 - 0,51X_1 X_2 - 0,94X_1 X_3 + 1,34 X_2 X_3.$$

Значение табличного критерия Кохрена при  $\nu = 8 \cdot 3 = 24$  и  $q = 0,10$  для нашего случая  $G_T = 0,5209$  [59].

Расчетное значение критерия Кохрена, с учетом данных, приведенных в таблице 2.5, будет равно:

$$G_p = \frac{S^2_{\max}}{\sum_{i=1}^N S^2_u} = \frac{9,0427}{25,50} = 0,355.$$

Так как  $G_p = 0,355 < G_T = 0,5209$ , общие дисперсии среднего  $S^2_y$  можно считать однородными.

Для оценки адекватности принятой модели исследуемому объекту последовательно определяем общую дисперсию среднего ( $S^2_y$ ), остаточную дисперсию ( $S^2_{\text{ост}}$ ) и дисперсию адекватности ( $S^2_{\text{ад}}$ ):

В соответствии с данными таблицей 2.5,  $S^2_y = 25,50$ .

$$S^2_{ocm} = \sum_{u=1}^N (Y_p - Y_{\gamma})^2 = 76,9 \text{ (таблица 4.4).}$$

$$S^2_{ad} = \frac{S^2_{ocm}}{f} = \frac{76,9}{1} = 76,9,$$

где  $f$  – число степеней свободы;  $f = N - z = 8 - 7 = 1$ ;  $N = 8$  – количество серий опытов;  $z$  – число значимых коэффициентов;  $z = 7$ .

Таблица 4.4 – Расчетные данные дисперсии адекватности

Точ ки	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	$\bar{Y}_p$	$\bar{Y}_\vartheta$	$S^2_{ocm} = \sum_{u=1}^N (Y_p - Y_\vartheta)^2$
1	34,26	- 13,36	+2,4	-1,43	- 0,51	- 0,94	+ 1,34	21,75	18,65	3,10 <sup>2</sup> =9,6
	+1	+1	<b>+1</b>	<b>+1</b>	+1	+1	+1			
2	34,26	+13,36	+2,4	-1,43	+0,51	+ 0,94	+ 1,34	51,39	54,48	3,09 <sup>2</sup> =9,5
	+1	-1	<b>+1</b>	<b>+1</b>	-1	-1	+1			
3	34,26	-13,36	-2,4	-1,43	0,51	- 0,94	- 1,34	15,29	18,40	3,11 <sup>2</sup> =9,7
	+1	+1	<b>-1</b>	<b>+1</b>	-1	+1	-1			
4	34,26	+13,36	-2,4	-1,43	- 0,51	+ 0,94	- 1,34	42,89	39,79	3,10 <sup>2</sup> =9,6
	+1	-1	<b>-1</b>	<b>+1</b>	+1	-1	-1			
5	34,26	- 13,36	+2,4	+1,43	- 0,51	+0,94	- 1,34	23,81	26,92	3,11 <sup>2</sup> =9,7
	+1	+1	<b>+1</b>	<b>-1</b>	+1	-1	-1			
6	34,26	+ 13,36	+2,4	+1,43	+ 0,51	- 0,94	- 1,34	49,69	46,57	3,12 <sup>2</sup> =9,7
	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1			
7	34,26	- 13,36	-2,4	+1,43	+ 0,51	+0,94	+ 1,34	22,71	19,61	3,10 <sup>2</sup> =9,6
	+1	+1	<b>-1</b>	<b>-1</b>	-1	-1	+1			
8	34,26	+13,36	-2,4	+1,43	- 0,51	- 0,94	+ 1,34	46,55	49,64	3,09 <sup>2</sup> =9,5
	+1	-1	<b>-1</b>	<b>-1</b>	+1	+1	+1			
Σ										76,9

В таком случае расчетное значение критерия Фишера будет равно:

$$F_p = \frac{S^2_{ad}}{S^2_y} = \frac{76,9}{25,5} = 3,02.$$

Табличное значение критерия Фишера  $F_T = 7,82$  при  $f = N - z = 8 - 7 = 1$ ;  $v = N(k - 1) = 24$  [59].

Так как  $F_p = 3,02 < F_T = 7,82$ , принятая модель адекватна исследуемому объекту.

Полученное в процессе реализации математического планирования эксперимента уравнение регрессии и результаты оптимизации позволяют сделать следующие выводы. Увеличение уровня варьирования первого фактора ( $X_1$ ), т.е. увеличение в составах пластифицирующей добавки СП-3 снижает прочностные свойства ЦКИМ, а второго ( $X_2$ ) – импульсная магнитная обработка воды и водно-цементных систем, наоборот – увеличивает их.

Наиболее оптимальным составом цементно-песчаных ЦКИМ можно считать состав номер два ( $R_c = 54,48$  МПа), у которого соотношение масс цемента и песка равно 1:2, массовая доля пластифицирующей добавки СП-3 в водно-цементной системе составляет 0,3 % от массы цемента при постоянном водоцементном отношении (В/Ц), равном 0,48 [203, 53, 92]. Оптимальным параметром магнитной обработки воды и цементно-водных систем ЦКИМ на первом и втором этапах, определенным методом математического планирования эксперимента, можно считать индукцию магнитного поля  $B = 0,378$  мТл с импульсом тока  $It = 30$  А·с при величине тока  $I = 0,5$  А в обмотке катушки электромагнита.

#### **4.2 Результаты планирования эксперимента по оптимизации составов цементно-водных ЦКИМ для заделки узких трещин**

Оптимизация составов цементно-водных композиционных инъекционных материалов (ЦКИМ) для заделки узких трещин в железобетонных конструкциях с шириной раскрытия 0,1 – 1,0 мм осуществлялась планом эксперимента типа  $2^3$ . В качестве факторов переменных были приняты:  $X_1$  – цементно-водное отношение составов (Ц/В);  $X_2$  – отношение массы наполнителя к массе цемента,  $m_n/m_{ц}$ ;  $X_3$  – импульс тока в катушке электромагнита ( $I \cdot t$ , А·с). Уровни варьирования принятых факторов приведены в таблице 3.7. Они были определены пробными экспериментами из условия обеспечения нагнетания ТКМ в узкие трещины с шириной раскрытия 0,1–0,5 при В/Ц = 0,75 и 0,5–1,0 при В/Ц = 0,5 с соблюдением необходимых прочностных и технологических свойств [144, 63].

Таблица 4.5 – Факторы и уровни их варьирования

Факторы	Обозначение факторов		Уровни варьирования факторов	
	в символах	кодированное	минимальный (-1)	максимальный (+1)
Цементно-водное (водоцементное отношение)	Ц/В (В/Ц)	$X_1$	1,33 (0,75)	2 (0,5)
Отношение массы наполнителя к массе цемента	$m_n/m_{ц}$	$X_2$	0,1	0,2
Импульс тока в катушке электромагнита, А·с	$I \cdot t$	$X_3$	10	30

План и результаты эксперимента приведены в таблице 4.6, расчет значимых коэффициентов регрессии, проверенных по критерию Стьюдента – в таблице 4.7.

Таблица 4.6 – План трехфакторного эксперимента и результаты оптимизации составов цементно-водных ТКМ

Номер серии опытов	Факторы (кодированные)						Параметры оптимизации $Y_i$ ; $Y_u$ (Прочность ЦТК на сжатие, $R_c$ , МПа)				
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1$ $X_2$	$X_1$ $X_3$	$X_2$ $X_3$	$Y_1$ ( $R_1$ )	$Y_2$ ( $R_2$ )	$Y_3$ ( $R_3$ )	$Y_4$ ( $R_4$ )	$\bar{Y}_i$ ( $R_{cp}$ )
1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	21,05	20,36	22,47	20,36	21,06
2	-1	-1	-1	+1	+1	+1	13,2	13,82	14,22	14,28	13,88
3	+1	+1	-1	+1	-1	-1	14,47	14,48	14,94	14,53	14,6
4	-1	+1	-1	-1	+1	-1	11,47	11,74	12,28	11,61	11,78
5	+1	-1	+1	-1	+1	-1	29,23	26,12	29,4	28,37	28,28
6	-1	-1	+1	+1	-1	-1	9,98	10,02	9,79	9,95	9,94
7	+1	+1	+1	+1	+1	+1	23,28	26,24	23,02	24,49	24,26
8	-1	+1	+1	-1	-1	+1	12,63	12,05	12,56	12,32	12,39

Проверка значимости коэффициентов регрессии проводилась путем сравнения их расчетных величин с табличными. При этом величина табличного значения критерия Стьюдента ( $t_T$ ) была равна  $t_T=1,7109$  при  $\nu=8 \cdot 3=24$  и  $q=0,10$  [59].

Таблица 4.7 – Расчет коэффициентов регрессии и оценка их значимости по критерию Стьюдента

N серий экспери- ментов	X <sub>1</sub>	Y <sub>ui</sub>		1. Определение коэффициента b <sub>1</sub> при X <sub>1</sub> и оценка его значимости
		+	-	
1	+1	21,06	-	$b_1 = \frac{\sum_{u=1}^N X_{iu} \bar{Y}_u}{N} = \frac{40,21}{8} = 5,03; \quad S^2_{\bar{y}} = \frac{\sum_{u=1}^N S^2_u}{N \cdot k} = 40,21^2 : 32 = 50,526;$  Так как $b_1 = 5,03 > \Delta b_1 = \pm t \sqrt{\frac{S^2_{\bar{y}}}{N}} = 1,7109 \cdot \sqrt{\frac{50,526}{8}} = 1,7109 \cdot 2,513 = 4,3.$  коэффициент при X <sub>1</sub> - значимый
2	-1	-	13,88	
3	+1	14,6	-	
4	-1	-	11,78	
5	+1	28,28	-	
6	-1	-	9,94	
7	+1	24,26	-	
8	-1	-	12,39	
		88,2	47,99	
88,2- 47,99 = 40,21				
N серий экспери- ментов	X <sub>2</sub>	Y <sub>ui</sub>		2. Определение коэффициента b <sub>2</sub> при X <sub>2</sub> и оценка его значимости
		+	-	
1	-1	-	21,06	$b_2 = \frac{\sum_{u=1}^N X_{iu} \bar{Y}_u}{N} = \frac{-10,13}{8} = -1,27; \quad S^2_{\bar{y}} = \frac{\sum_{u=1}^N S^2_u}{N \cdot k} = (-10,13)^2 : 32 = 3,207;$  Так как $b_2 = 1,27 > \Delta b_2 = \pm t \sqrt{\frac{S^2_{\bar{y}}}{N}} = 1,7109 \cdot \sqrt{\frac{3,207}{8}} = 1,7109 \cdot 0,632 = 1,08.$  коэффициент при X <sub>2</sub> – значимый
2	-1	-	13,88	
3	+1	14,6	-	
4	+1	11,78	-	
5	-1	-	28,28	
6	-1	-	9,94	
7	+1	24,26	-	
8	+1	12,39	-	
		63,03	73,16	
73,16-63,03= - 10,13				
N серий экспери- ментов	X <sub>3</sub>	Y <sub>ui</sub>		3. Определение коэффициента b <sub>3</sub> при X <sub>3</sub> и оценка его значимости
		+	-	
2	-1	-	13,88	$b_3 = \frac{\sum_{u=1}^N X_{iu} \bar{Y}_u}{N} = \frac{13,55}{8} = 1,69; \quad S^2_{\bar{y}} = \frac{\sum_{u=1}^N S^2_u}{N \cdot k} = 13,55^2 : 32 = 5,738;$  Так как $b_3 = 1,69 > \Delta b_3 = \pm t \sqrt{\frac{S^2_{\bar{y}}}{N}} = 1,7109 \cdot \sqrt{\frac{5,738}{8}} = 1,7109 \cdot 0,847 = 1,449.$  коэффициент при X <sub>3</sub> – значимый
3	-1	-	14,6	
4	-1	-	11,78	
5	+1	28,28	-	
6	+1	9,94	-	
7	+1	24,26	-	
8	+1	12,39	-	
		74,87	61,32	
74,87- 61,32= 13,55				

## Окончание таблицы 4.7

N серий экспери- ментов	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	Y <sub>ui</sub>		<b>4. Определение коэффициента b<sub>4</sub> при X<sub>1</sub>X<sub>2</sub> и оценка его значимости</b>
		+	-	
1	-1	-	21,06	$b_4 = \frac{\sum_{u=1}^N X_{iu} \bar{Y}_u}{N} = \frac{-10,83}{8} = -1,35; \quad S^2_{\bar{y}} = \frac{\sum_{u=1}^N S_u^2}{N \cdot k} = (-10,83)^2 : 32 = 3,665;$ Так как b <sub>4</sub> =1,35>Δb <sub>4</sub> = ±t√ $\frac{S^2_{\bar{y}}}{N}$ =1,7109·√ $\frac{3,665}{8}$ =1,7109·0,677=1,158. коэффициент при X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> – значимый
2	+1	13,88	-	
3	+1	14,6	-	
4	-1	-	11,78	
5	-1	-	28,28	
6	+1	9,94	-	
7	+1	24,26	-	
8	-1	-	12,39	
		62,68	73,51	
- 73,51-62,68= -10,83				
N серий экспери- ментов	X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	Y <sub>ui</sub>		<b>5 . Определение коэффициента b<sub>5</sub> при X<sub>1</sub>X<sub>3</sub> и оценка его значимости</b>
		+	-	
1	-1	-	21,06	$b_5 = \frac{\sum_{u=1}^N X_{iu} \bar{Y}_u}{N} = \frac{20,21}{8} = 2,53; \quad S^2_{\bar{y}} = \frac{\sum_{u=1}^N S_u^2}{N \cdot k} = 20,21^2 : 32 = 12,764;$ Так как b <sub>5</sub> =2,53>Δb <sub>5</sub> = ±t√ $\frac{S^2_{\bar{y}}}{N}$ =1,7109·√ $\frac{12,764}{8}$ =2,16. коэффициент при X – значимый
2	+1	13,88	-	
3	-1	-	14,6	
4	+1	11,78	-	
5	+1	28,28	-	
6	-1	-	9,94	
7	+1	24,26	-	
8	-1	-	12,39	
		78,20	57,99	
78,20- 57,99= 20,21				
N серий экспери- ментов	X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	Y <sub>ui</sub>		<b>6 . Определение коэффициента b<sub>6</sub> при X<sub>2</sub>X<sub>3</sub> и оценка его значимости</b>
		+	-	
1	+1	21,06	-	$b_6 = \frac{\sum_{u=1}^N X_{iu} \bar{Y}_u}{N} = \frac{6,99}{8} = 0,87; \quad S^2_{\bar{y}} = \frac{\sum_{u=1}^N S_u^2}{N \cdot k} = 6,99^2 : 32 = 1,527;$ Так как b <sub>6</sub> =0,87>Δb <sub>6</sub> = ±t√ $\frac{S^2_{\bar{y}}}{N}$ =1,7109·√ $\frac{1,527}{8}$ =1,7109·0,437=0,748. коэффициент при X <sub>2</sub> – значимый
2	+1	13,88	-	
3	-1	-	14,6	
4	-1	-	11,78	
5	-1	-	28,28	
6	-1	-	9,94	
7	+1	24,26	-	
8	+1	12,39	-	
		71,59	64,60	
71,59-64,60=6,99				



В соответствии с полученными данными уравнение регрессии со значимыми коэффициентами имеет вид:

$$\bar{Y}(R_c) = 17,02 + 5,03 X_1 - 1,27 X_2 + 1,69 X_3 - 1,35 X_1 X_2 + 2,53 X_1 X_3 + 0,87 X_2 X_3.$$

При этом расчетный параметр оптимизации  $Y_{pi}(R_c, \text{МПа})$  для каждой серии опытов будет иметь следующие численные значения:

$$y_1 = 17,02 + 5,03(1) - 1,27(-1) + 1,69(-1) - 1,35(-1) + 2,53(-1) = 20,45 + 0,87 = 21,32$$

$$y_2 = 17,02 + 5,03(-1) - 1,27(-1) + 1,69(-1) - 1,35(1) + 2,53(1) = 12,75 + 0,87 = 13,62$$

$$y_3 = 17,02 + 5,03(1) - 1,27(1) + 1,69(-1) - 1,35(1) + 2,53(-1) = 15,21 - 0,87 = 14,34$$

$$y_4 = 17,02 + 5,03(-1) - 1,27(1) + 1,69(-1) - 1,35(-1) + 2,53(1) = 12,91 - 0,87 = 12,04$$

$$y_5 = 17,02 + 5,03(1) - 1,27(-1) + 1,69(1) - 1,35(-1) + 2,53(1) = 28,89 - 0,87 = 28,02$$

$$y_6 = 17,02 + 5,03(-1) - 1,27(-1) + 1,69(1) - 1,35(1) + 2,53(-1) = 11,07 - 0,87 = 10,20$$

$$y_7 = 17,02 + 5,03(1) - 1,27(1) + 1,69(1) - 1,35(1) + 2,53(1) = 23,65 + 0,87 = 24,52$$

$$y_8 = 17,02 + 5,03(-1) - 1,27(1) + 1,69(1) - 1,35(-1) + 2,53(-1) = 11,23 + 0,87 = 12,10$$

Результаты обработки данных эксперимента, необходимые для проверки по критериям Кохрена и Фишера, приведены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Результаты обработки данных математического планирования эксперимента

Номер серии опытов	Параметры оптимизации $Y_i$ ; $Y_u$ (Прочность на сжатие, $R_c$ , МПа)					$\sum_{u=1}^k (Y_i - \bar{Y}_i)^2$	$S^2_u = \frac{\sum_{i=1}^k (Y_i - \bar{Y}_i)^2}{k-1}$ ; ( $k = 4$ ).	$Y_{pi}$	$S^2_a = \frac{\sum_{i=1}^k (Y_{pi} - Y_u)^2}{N - z}$ N-число серий опытов; z-число значимых коэффициентов
	$Y_1$ ( $R_1$ )	$Y_2$ ( $R_2$ )	$Y_3$ ( $R_3$ )	$Y_4$ ( $R_4$ )	$\bar{Y}_i$ ( $R_{cp}$ )				
1	21,05	20,36	22,47	20,36	<b>21,06</b>	2,1682	0,723	<b>21,32</b>	$(21,32 - 21,06)^2 : (8-6) = 0,0676 : 2 = 0,0338$
2	13,2	13,82	14,22	14,28	<b>13,88</b>	0,7416	0,247	<b>13,62</b>	$(13,88 - 13,62)^2 : (8-6) = 0,0676 : 2 = 0,0338$
3	14,47	14,48	14,94	14,53	<b>14,6</b>	0,1518	0,051	<b>14,34</b>	$(14,6 - 14,34)^2 : (8-6) = 0,0676 : 2 = 0,0338$
4	11,47	11,74	12,28	11,61	<b>11,78</b>	0,3766	0,126	<b>12,04</b>	$(12,04 - 11,78)^2 : (8-6) = 0,0676 : 2 = 0,0338$
5	29,23	26,12	29,4	28,37	<b>28,28</b>	6,8306	<b>2,277</b>	<b>28,02</b>	$(28,28 - 28,02)^2 : (8-6) = 0,0676 : 2 = 0,0338$
6	9,98	10,02	9,79	9,95	<b>9,94</b>	0,0306	0,010	<b>10,20</b>	$(10,20 - 9,94)^2 : (8-6) = 0,0676 : 2 = 0,0338$
7	23,28	26,24	23,02	24,49	<b>24,26</b>	6,4713	2,157	<b>24,52</b>	$(24,52 - 24,26)^2 : (8-6) = 0,0676 : 2 = 0,0338$
8	12,63	12,05	12,56	12,32	<b>12,39</b>	0,207	0,069	<b>12,10</b>	$(12,39 - 12,10)^2 : (8-6) = 0,0841 : 2 = 0,0420$
						16,98	<b>5,66</b>		<b>0,2786</b>

Значение табличного критерия Кохрена при  $\nu_1=k-1=3$ ;  $\nu_2=N=8$  и  $q=0,01$  для нашего случая  $G_T = 0,5209$  [100]. Расчетное значение критерия Кохрена, с учетом данных, приведенных в таблице 3.10, будет равно:

$$G_p = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{i=1}^N S_u^2} = \frac{2,277}{5,66} = 0,402$$

Так как  $G_p = 0,402 < G_T = 0,5209$ , общие дисперсии среднего  $S_y^2$  можно считать однородными.

Для оценки адекватности принятой модели исследуемому объекту последовательно определяем дисперсию адекватности ( $S_{ад}^2$ ), общую дисперсию среднего ( $S_y^2$ ) и расчетный критерий Фишера:

$$S_{ост}^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (Y_{pi} - Y_u)^2}{N - z} = \frac{0,2786}{8 - 7} = 0,2786;$$

$$S_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^N S_u^2}{N \cdot k} = \frac{5,66}{32} = 0,177;$$

$$F_p = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2} = \frac{0,2786}{0,177} = 1,574.$$

где  $f$  – число степеней свободы;  $f = N - z = 8 - 7 = 1$ ;  $N = 8$  – количество серий опытов;  $z$  – число значимых коэффициентов;  $z = 7$ .

Так как  $F_p = 1,574 < F_T = 5,61$  [100], принятую модель можно считать адекватной объекту исследования, принятому по рабочей гипотезе.

Результаты оптимизации составов ЦКИМ для заделки узких трещин в железобетонных конструкциях позволили сделать следующие выводы:

– наиболее значимыми факторами, влияющими на прочность ЦКИМ, являются – первый (Ц/В), определяющий массовое соотношение воды и цемента в составах ЦКИМ и второй – параметры магнитной обработки воды [64];

– оптимальным составом для заделки узких трещин следует считать состав номер 5, так как по принятому отклику он имел наибольшую прочность на сжатие ( $R_c = 28,28$  МПа);

– принятые уровни варьирования факторов соответствуют требованиям технологии по инъекционной заделке трещин и характеристикам оборудования, обеспечивающим необходимые параметры локального магнитного поля для осуществления оптимальной активации воды и водных систем ЦКИМ.

Как известно, предел прочности цементного камня определяется зависимостью

$$R = R_0 \exp(kP), \quad (4.1)$$

где  $P$  – пористость,  $R_0$  – предел прочности при «нулевой» пористости (прочность «скелета»).

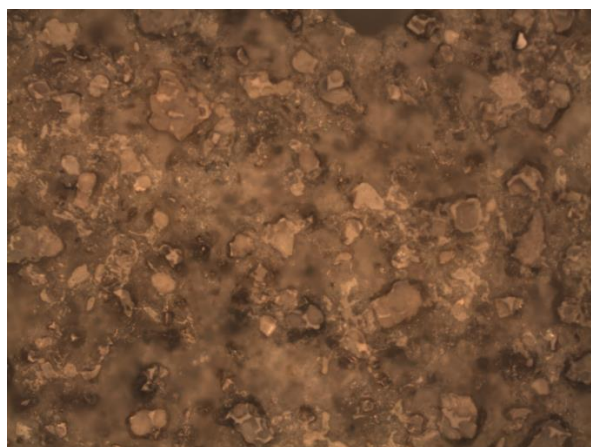
Пористость цементного камня определяется зависимостью [2]

$$\begin{aligned} P = kV_0 - V &= \frac{kЦ}{\rho_{Ц}} + kB - \left( \frac{(1+n)\alpha Ц}{\rho_{ГЦ}} + \frac{(1-\alpha)Ц}{\rho_{Ц}} \right) = \\ &= Ц \left( \frac{k}{\rho_{Ц}} + \frac{kB}{Ц} \right) - Ц \left( \frac{(1+n)\alpha}{\rho_{ГЦ}} + \frac{1-\alpha}{\rho_{Ц}} \right), \end{aligned} \quad (4.2)$$

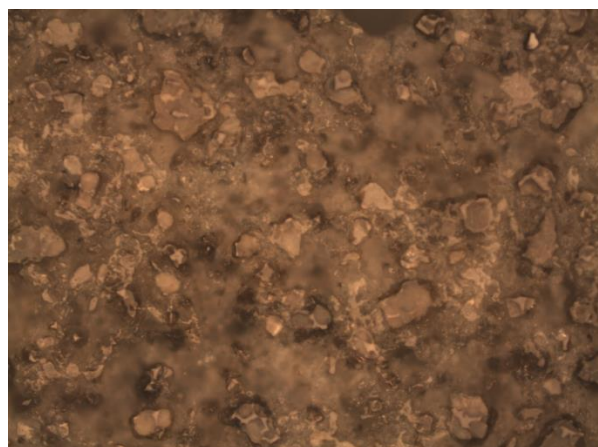
где  $Ц$  – расход цемента,  $B$  – расход воды,  $n$  – количество воды, химически связываемой цементом при полной гидратации,  $\alpha$  – степень гидратации,  $\rho_{Ц}$ ,  $\rho_{ГЦ}$  – истинная плотность портландцемента и цементного камня,  $k$  – коэффициент, учитывающий изменение объема цементного теста (камня) в процессе гидратации.

Из (4.2) следует, что пористость цементного камня, и, следовательно, его прочность, определяется величиной степени гидратации. Фактически, по величине тепловыделения можно судить о степени гидратации цемента  $\alpha = Q_{\tau} / ([Q])$ , и, следовательно, об изменении пористости. Таким образом, оценка степени гидратации цемента по величине тепловыделения позволяет прогнозировать предел прочности цементного камня в любом возрасте в процессе гидратации.

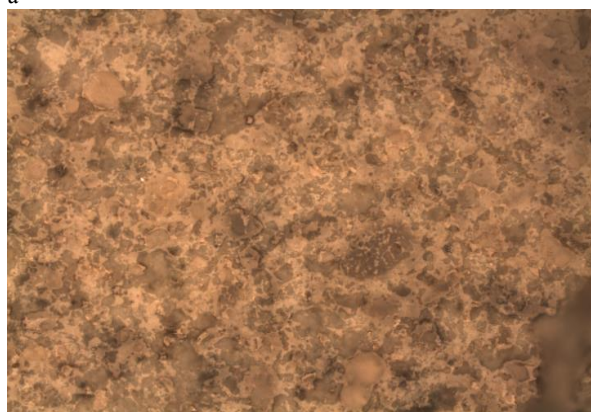
С помощью этого метода можно оценить влияние на процесс гидратации и, следовательно, кинетику прочности, такого физического параметра, как пористость. Таким образом, снижение пористости на 20% в оптимальных составах является косвенным доказательством выдвинутой научной гипотезы (рисунок 4.1, 4.2).



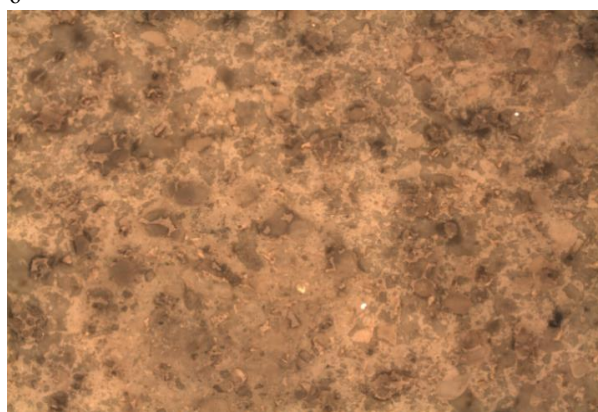
а



б

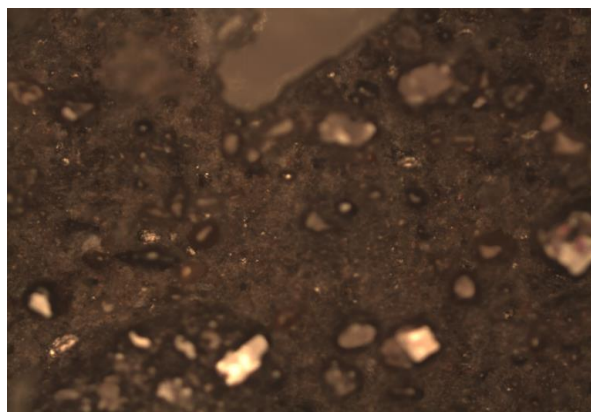


в

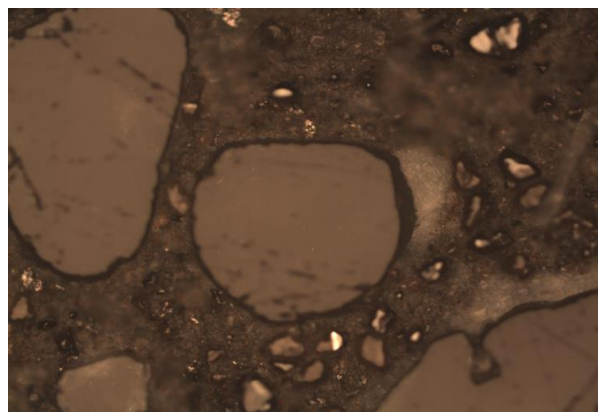


г

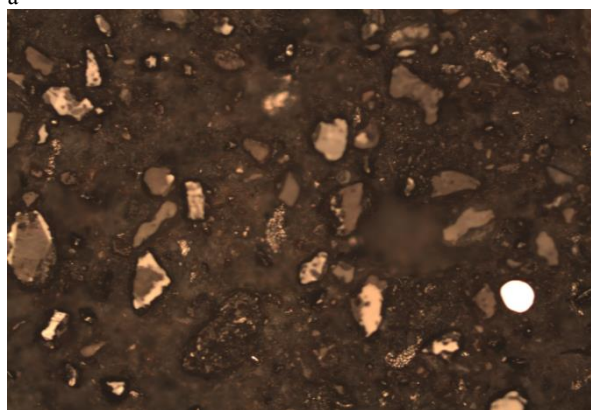
Рисунок 4.1 - Микроструктура образцов ЦКИМ для заполнения узких трещин



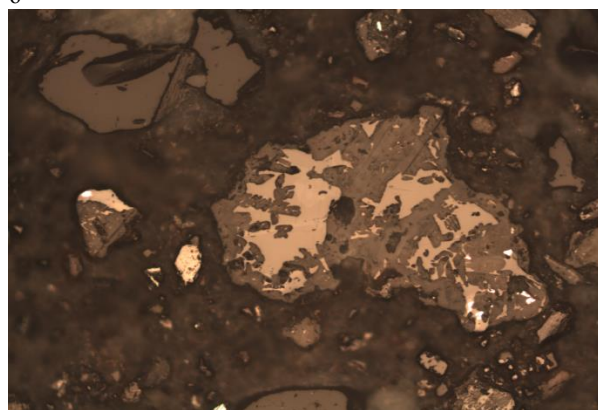
а



б



в



г

Рисунок 4.2 - Микроструктура образцов ЦКИМ для заполнения широких трещин

### 4.3 Исследование реологических свойств оптимальных составов

Реологические свойства смесей ЦКИМ оценивались по диаметру их расплыва на встряхивающем столике и напряжению сдвига. Методики испытания и характеристики испытательного оборудования изложены в разделе 2.

Результаты оценки реологических свойств смесей ЦКИМ по диаметру расплыва конуса приведены на рисунке 4.3 и в таблице 4.9.

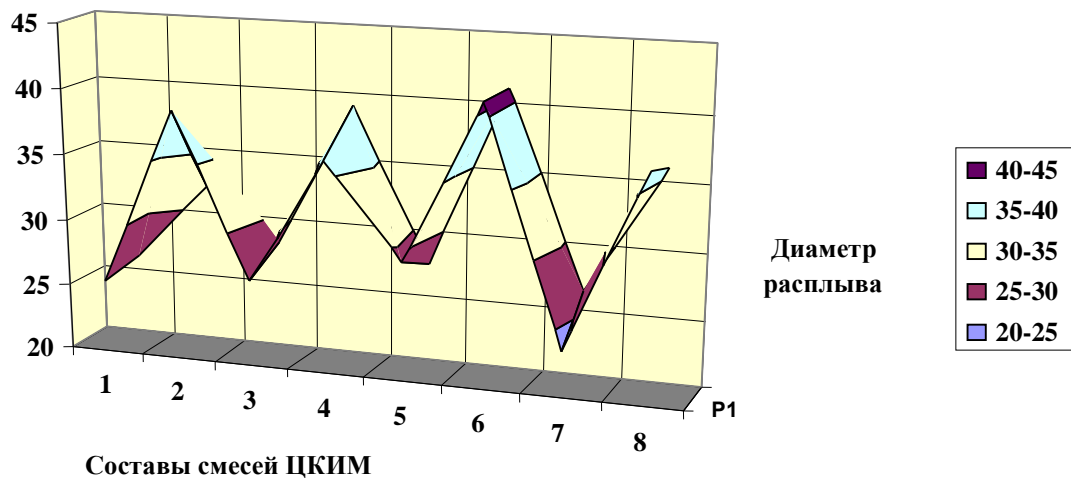


Рисунок 4.3 – Результаты оценки реологических смесей ЦКИМ по диаметру расплыва конуса на встряхивающем столике (составы смесей см. таблицу 4.9)

Оценка реологических свойств смесей ЦКИМ по напряжению сдвига производилась с помощью устройства в виде градуированного стеклянного цилиндра с поршнем. Давление в цилиндре создавалось грушей от медицинского тонометра. С учетом предварительно полученных тарифовочных данных (см. главу 2) были получены экспериментальные величины напряжений сдвига смесей разных составов ЦКИМ (рисунок 4.4).



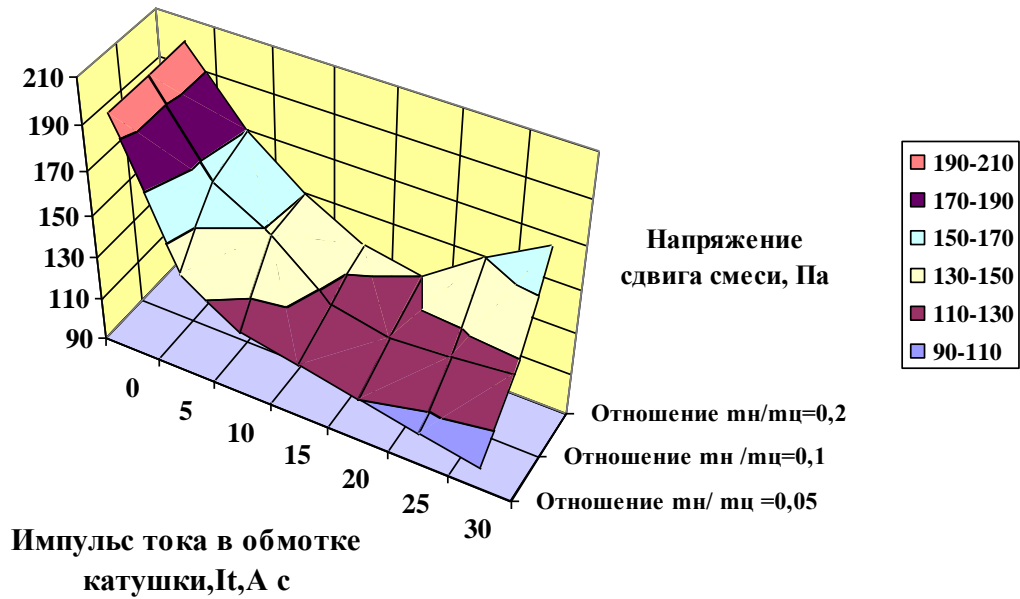


Рисунок 4.4 – Зависимости напряжения сдвига смесей ЦКИМ с разным насыщением матрицы наполнителем из конвертерного шлака (с отношением масс наполнителя и цемента  $m_n/m_c = 0,05; 0,1$  и  $0,2$ )

По результатам экспериментальных исследований реологических свойств смесей ЦКИМ можно сделать следующий вывод. Самый большой диаметр расплыва конуса для смесей с обоими видами наполнителя был у состава 6 ( $D=41$  см). Минимальное напряжение сдвига ( $\tau=100$  Па) было отмечено у состава ЦКИМ с соотношением масс наполнителя (из конвертерного шлака) и цемента  $0,05$  [69, 94]. Данные многочисленных исследований показывают, что реологические характеристики растворных смесей, для которых величина диаметра расплыва конуса составляет  $29 - 39$  см, а напряжение сдвига находится в пределах  $100-125$  Па, обычно бывают лишь в том случае, когда в них вводятся специальные пластифицирующие добавки типа суперпластификаторов: С-3, МФАР и другие [74, 65, 60, 30, 31, 126, 127, 58]. То есть, в данном случае, пластификацию смесей удалось выполнить за счет соответствующих величин параметров локального магнитного поля, а кроме увеличения прочности, это уже другой существенный технико-экономический эффект двухэтапной обработки цементно-водных тампонажных смесей магнитным локальным полем.

Таблица 4.9 – Результаты оценки реологических свойств смесей ЦКИМ по распливу конуса на встряхивающем столике

Номер состава	Состав смесей ЦКИМ (масса, г)					Параметры активации воды локальным магнитным полем				Расплав конуса смесей, D, см с наполнителем из	
	вода	цемент	напол- нитель	В/Ц	m <sub>н</sub> /m <sub>ц</sub>	индукция, В, мТл	сила тока, I, А	время воздей- ствия, t,с	им- пульс тока, It, А·с	конвертер- ного шлака	отходов от обра- ботки металлов абразивным ин- струментом
1	160	320	32	0,5	0,1	0,378	0,5	20	10	25,5	26
2		213,3	21,3	0,75						39	32
3		320	64	0,5	0,2					26,5	28,2
4		213,3	42,7	0,75						36	39
5		320	32	0,5	0,1			60	30	29	27,5
6		213,3	21,3	0,75						41	41
7		320	64	0,5	0,2			23,5	26,5		
8		213,3	42,7	0,75				37	36		

е

#### 4.4 Оценка объемных деформаций усадки ЦКИМ в процессе их твердения

Усадочные деформации ЦКИМ определялись на образцах  $100 \times 100 \times 400$  мм в процессе их твердения через 30, 60, 90 и 120 суток. Условия их хранения, средства и методики измерения параметров приведены в главе 2.

Численные значения усадочных деформации в разные периоды твердения образцов ЦКИМ отображены на рисунках 4.5 и 4.6.

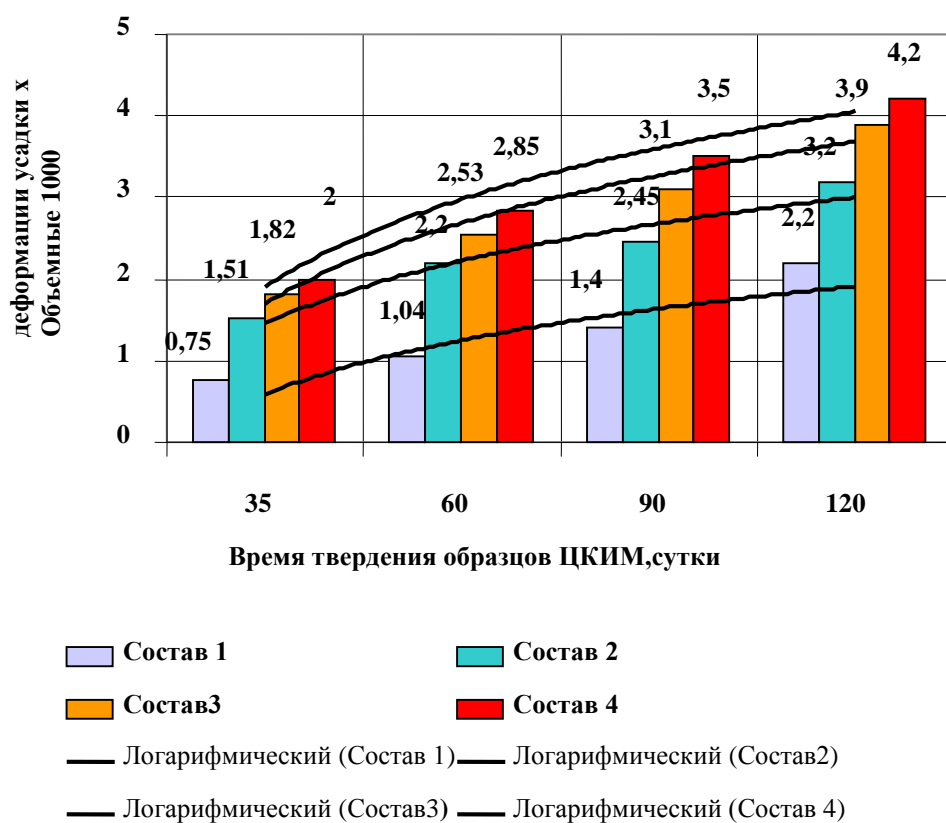


Рисунок 4.5 – Диаграмма, отображающая зависимость объемных усадочных деформаций образцов ЦКИМ от времени их твердения

Ряды 1 и 2 на рисунках 4.5 и 4.6 характеризуют параметры усадочных деформаций образцов ЦКИМ с В/Ц соответственно равным 0,50 и 0,75, в смесях которых вода активировалась локальным магнитным полем с воздействием на нее индукции



$B=0,378$  мТл в течение времени  $t=60$  с. Ряды 3 и 4 представляют собой значения усадочных деформаций образцов ЦКИМ с теми же значениями  $B/C$ , в смесях которых вода не активировалась магнитным полем [63, 149].

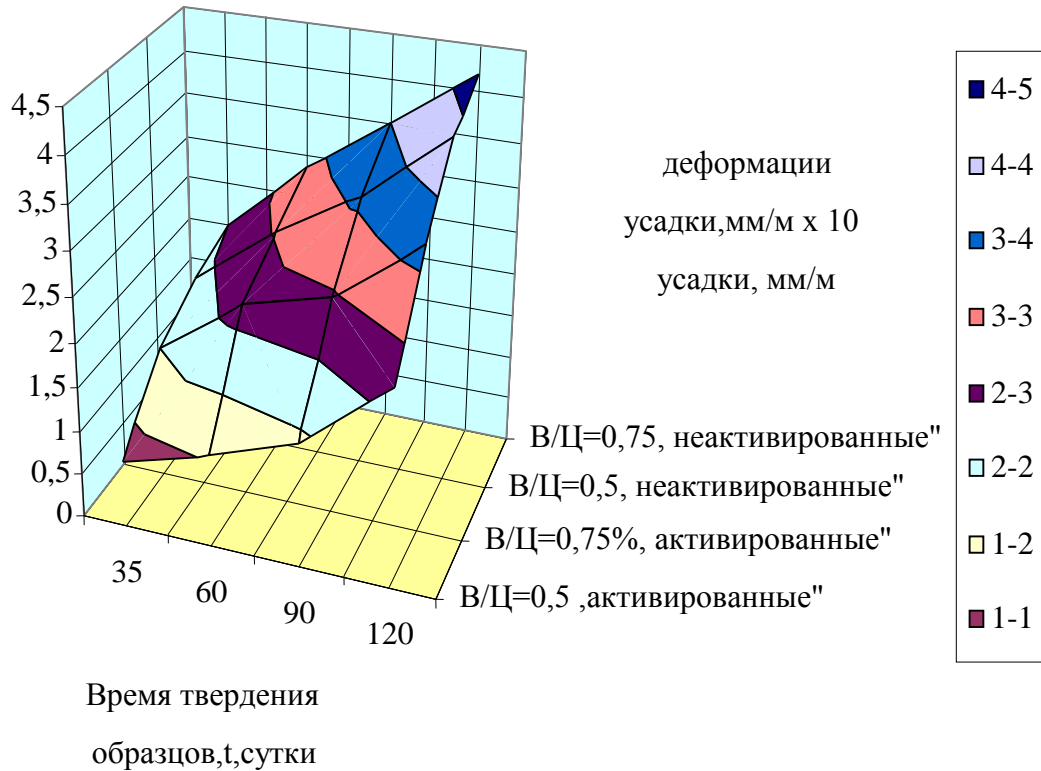


Рисунок 4.6 – Объемное изображение процесса объемных усадочных деформаций образцов ЦКИМ с их фиксацией по времени твердения

Результаты экспериментальных исследований процесса усадочных деформаций образцов ЦКИМ позволили сделать следующие утверждения:

- процесс усадки образцов ЦКИМ во времени носит логарифмический характер и может быть описан соответствующими математическими зависимостями;
- усадочные деформации имеют меньшие численные значения у составов с активированной водой с меньшими значениями водоцементного отношения смесей.

В таблице 4.10 приведены математические зависимости, которые позволяют определять усадочные деформации ЦКИМ в фиксированные моменты их твердения (35, 60, 90 и 120 суток).

Таблица 4.10 – Формулы для определения усадочных деформаций ЦКИМ

Водоцементное отношение смесей ЦКИМ В/Ц	Коэффициент, $k_i \times 10^{-3}$	Период твердения образцов, $\tau$ , сут.	Формулы
0,5	1,40	35	$\varepsilon_y = k_i \frac{B}{Ц} + \ell g \tau = k_i \frac{B}{Ц} + 0,74$
0,75	2,20		
0,5	2,45	60	$\varepsilon_y = k_i \frac{B}{Ц} + \ell g \tau = k_i \frac{B}{Ц} + 1,51$
0,75	3,20		
0,5	3,10	90	$\varepsilon_y = k_i \frac{B}{Ц} + \ell g \tau = k_i \frac{B}{Ц} + 1,817$
0,75	3,90		
0,5	3,421	120	$\varepsilon_y = k_i \frac{B}{Ц} + \ell g \tau = k_i \frac{B}{Ц} + 1,817$
0,75	4,121		

#### 4.5 Результаты экспериментальных исследований параметров локального магнитного поля в контактной зоне металл-бетон

Для того, чтобы правильно проанализировать экспериментальные данные о целесообразных оптимальных параметрах локального магнитного поля в дефектных местах границ металл-бетон, необходимо изучить физические механизмы магнитного насыщения металлических закладных деталей под воздействием внешнего источника. Материалом для изготовления закладных деталей защитных сооружений служит сталь Ст-3, который в свою очередь является ферромагнетиком. Известно, что в любом ферромагнетике могут образовываться области самопроизвольной намагниченности. Некоторые авторы называют эти области доменами [128, 129, 130]. Домены разделены между собой слоями, так называемыми блоховскими стенками или границами доменов. На границах виден постепенный переход от одного направления намагниченности к другому (рисунок 4.7).

Если отсутствует внешнее магнитное поле, то в закладной детали результирующее магнитное поле приравнивается к нулю из-за разнонаправленных магнитных моментов, которые друг друга компенсируют (см. рисунок 4.7 а).

При появлении внешнего магнитного поля ( $H > 0$ ) происходит намагничивание ферромагнетика. Процесс характеризуется смещением границ и ростом одних доменов за счет других (см. рисунок 4.7 б).

При достижении намагниченности насыщения доменная структура исчезает, и, можно считать, что весь металл закладной детали представляет собой один домен (см. рисунок 4.7 в).

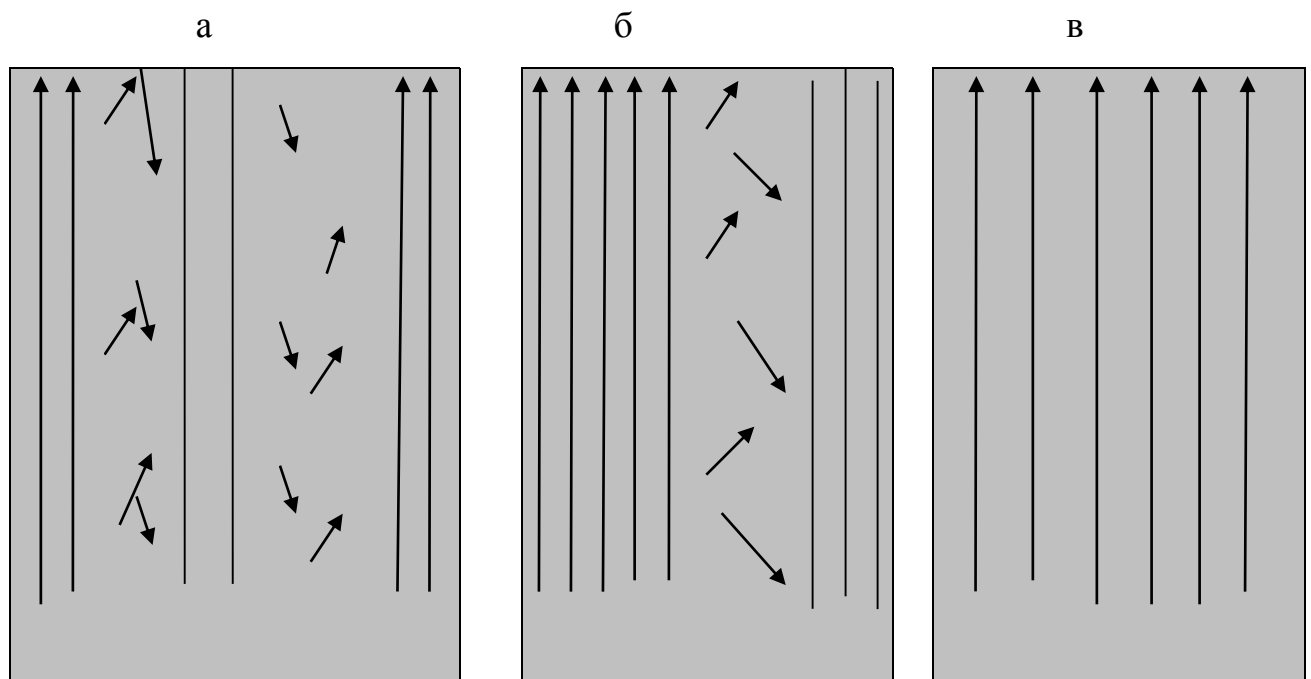


Рисунок 4.7 – Механизм магнитного насыщения закладной детали под воздействием внешнего локального магнитного поля: а – в случае, когда внешнего магнитного поля нет ( $H=0$ ); б – в случае, когда магнитное поле слабое ( $0 < H < H_{\max}$ ); в – в случае, когда металл имеет магнитное насыщение ( $H=H_{\max}$ )

Проанализируем зависимость индукции магнитного поля от напряженности для стали Ст-3 (рисунок 4.8).

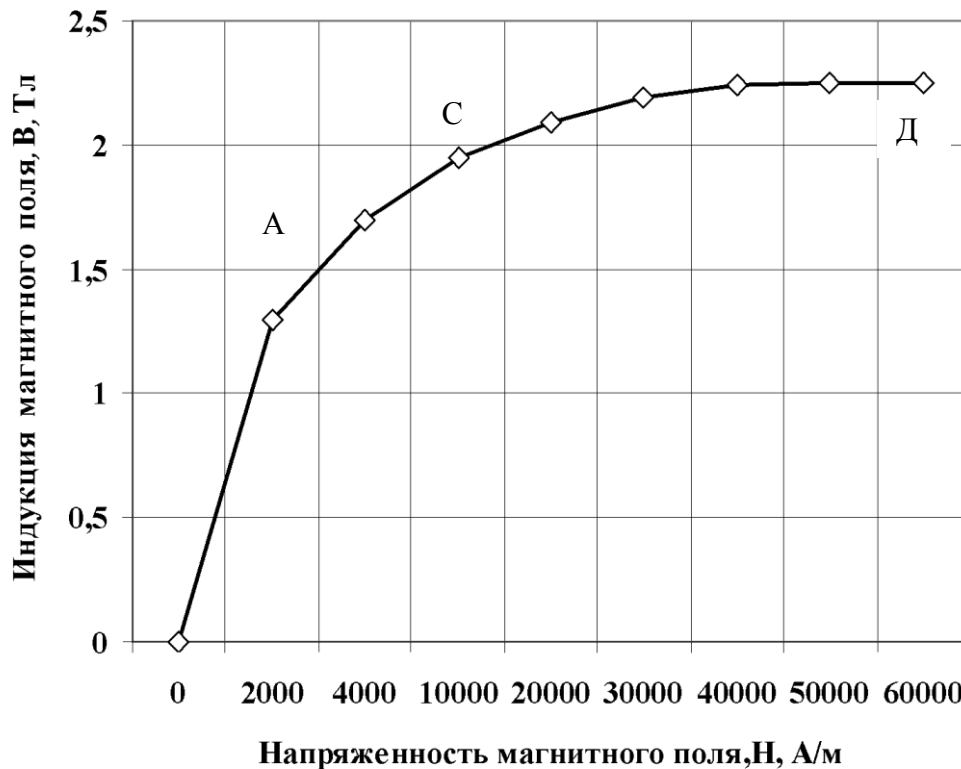


Рисунок 4.8 – Кривая намагничивания стали Ст-3 [70]

На рисунке изображена зависимость  $B = f(H)$ , имеющая характерную нелинейную форму с участком насыщения. При возрастании напряженности магнитного поля от 0 до 2000 А/м происходит постепенное смещение доменных стенок (участок ОА).

В случае увеличения напряженности магнитного поля от 2000 до 30000 А/м наблюдается ступенчатое перемещение стенок доменов, а также векторная переориентация магнитных моментов доменов в направлении внешнего поля [26, 3]. Описанный механизм характерен на участке АС. Отрезок СД соответствует полному насыщению металла. Так как спиновые моменты электронов кристаллической решетки стали переориентируются, то запускается механизм насыщения.

В материале закладной детали из Ст-3 при индукции магнитного поля, равной 2,25 Тесла, наступает полное насыщение.

В условиях промышленного и специального строительства с использованием даже современных магнитных устройств практически невозможно создать в ограждающей конструкции с закладными деталями из Ст-3 такое насыщенное локальное магнитное поле с индукцией 2,25 Тл.

Основным параметром внешнего локального магнитного поля, как дополнительного источника перемещения и удерживания в неплотностях магнитных тампонажных смесей ЦКИМ, считают магнитную индукцию. Она является функцией напряженности магнитного поля ( $B=f(H)$ ). Результаты исследований технологических и прочностных свойств тампонажных смесей с ферромагнитными наполнителями позволили сделать вывод о том, что изменением индукции в незначительных пределах можно регулировать структурную вязкость транспортируемых композиций, уменьшая ее при движении в узких трещинах и увеличивая в широких, снижать время отверждения герметиков, когда смесь находится в вертикальных неплотностях, повышать прочность и адгезию. По мнению В.А. Заварова, М.Д. Бойко, А.С. Бочарникова, для технологии герметизации неплотностей на поверхности раздела металл-бетон минимальное значение магнитной индукции внешнего локального поля должно быть не менее 0,001 Тл (1 мТл) [27, 119, 28].

Поэтому одной из основных задач этой работы являлся выбор из всех известных магнитных устройств такого устройства, которое могло бы создавать в дефектной зоне бетона на контакте с металлом минимально предельные значения индукции магнитного поля от внешнего источника, обеспечивающие следующие условия процесса тампонажных работ:

- создание возможности активации водных систем смесей ЦКИМ на втором этапе (в процессе их нагнетания в трещины);
- обеспечение условий для улучшения прочностных и других свойств ЦКИМ, а также регулирование вязкости их смесей в процессе проведения разных этапов тампонажных работ [93, 96] (уменьшения ее при заделки узких трещин и увеличения при отверждении смесей в вертикальных и наклонных трещинах, из которых они, при отсутствии воздействия магнитного поля, вытекают под действием собственной тяжести);

- уменьшение энергозатрат за счет снижения давления и силы нагнетания при включении в процесс дополнительной магнитодвижущей силы локального магнитного поля.

Для уточнения предельных значений минимальных величин индукции магнитного поля на поверхности раздела металл-бетон нами были проведены собственные экспериментальные исследования, которые основывались на следующих утверждениях.

Известно, что закладные детали ограждающих конструкций защитных сооружений изготавливают из стали Ст-3. При этом в практике строительства защитных сооружений в основном встречаются толщины 3, 5, 9 мм [131-133]. В связи с этим, в качестве объектов исследований были приняты модели-образцы металлических пластин с указанными толщинами.

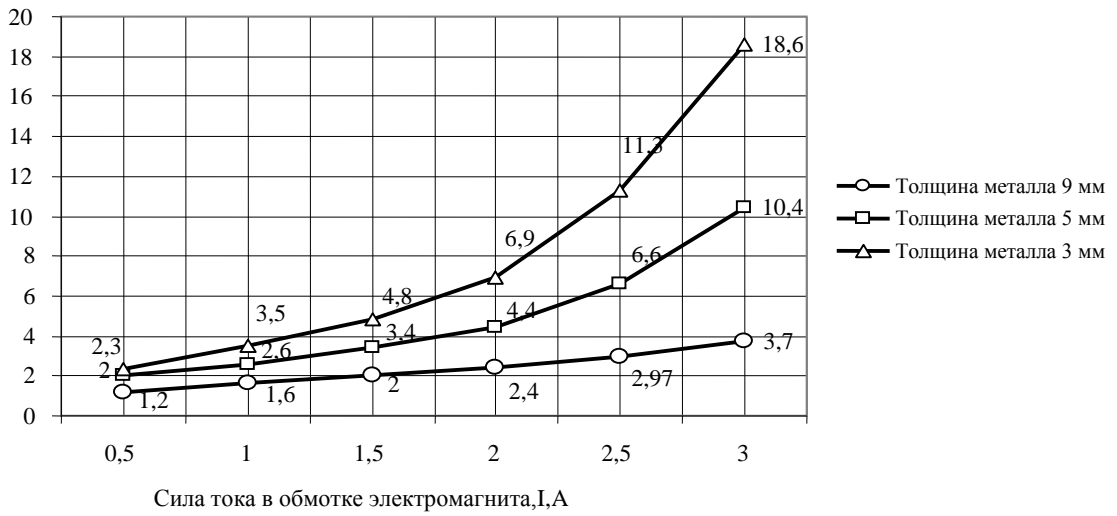
Основной задачей, поставленной в экспериментальных исследованиях, являлось определение предельных минимальных величин магнитной индукции на моделях-образцах по центру металлических пластин и установление характера ее распределения на поверхности контакта металл-бетон в направлении от центра пластины к ее краям, на которых с обратной стороны пластины располагались полюсные стойки электромагнита.

Для создания на поверхности раздела металл-бетон магнитного поля необходимой мощности использовалось специальное магнитное устройство, предложенное Бочарниковым А.С. и Гончаровой М.А. [179]. Характерной особенностью этого устройства является то, что оно позволяет создавать в смесях ЦКИМ в дефектных местах бетона на контакте с металлом магнитное поле с требуемыми оптимальными параметрами индукции и напряженности, без необходимости полного магнитного насыщения металла мощными магнитными устройствами, которых в настоящее время не существует.

Методика, с помощью которой исследовалась индукция магнитного поля на поверхности пластин по их центру, приведена в главе 2. Результаты отображены на рисунке 4.9.

а

Магнитная индукция, В, мТл



б

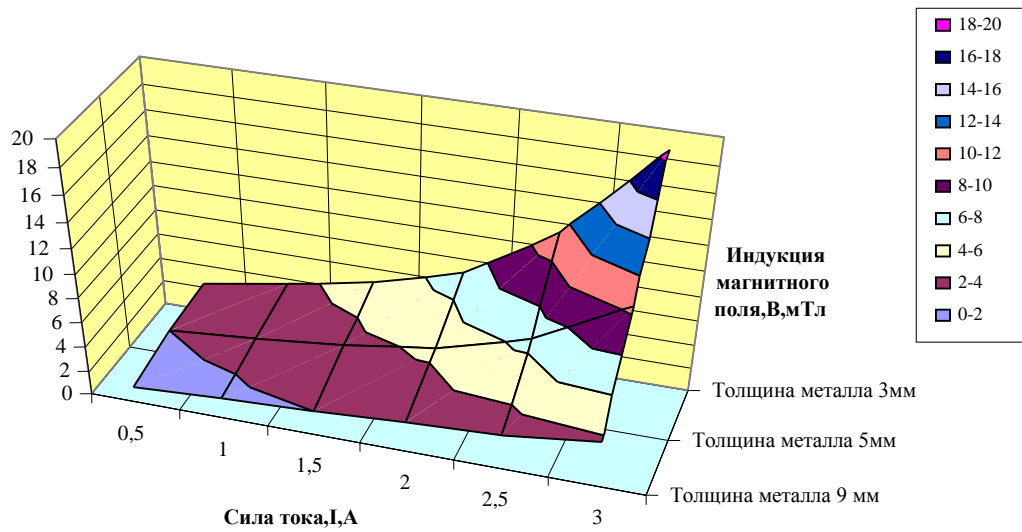


Рисунок 4.9 – Численные значения магнитной индукции на поверхностях металлических пластин, обратных установки центра полюсных стоек электромагнита магнитного устройства в виде обработки данных по программе «мастер диаграмм»: а – график; б – поверхность

Результаты экспериментальных исследований, приведенные на рисунке 4.9, позволили сделать следующий основной вывод: создание предельного минимального значения индукции локального магнитного поля на поверхности металла (не

менее 0,378 мТл) по центру установленных на обратной стороне полюсных стоек электромагнита, возможно для магнитного устройства, у которого в обмотке электромагнита из провода ПЭВ диаметром 1,2 мм с числом витков 1200 ток будет не менее 0,5 А. Однако, при удалении от указанных точек к центру пластин индукция магнитного поля будет ослабевать. В связи с этим потребовались дополнительные исследования характера изменения индукции локального магнитного поля в точках, удаленных от полюсов. Результаты таких исследований приведены на рисунках 4.10-4.12.

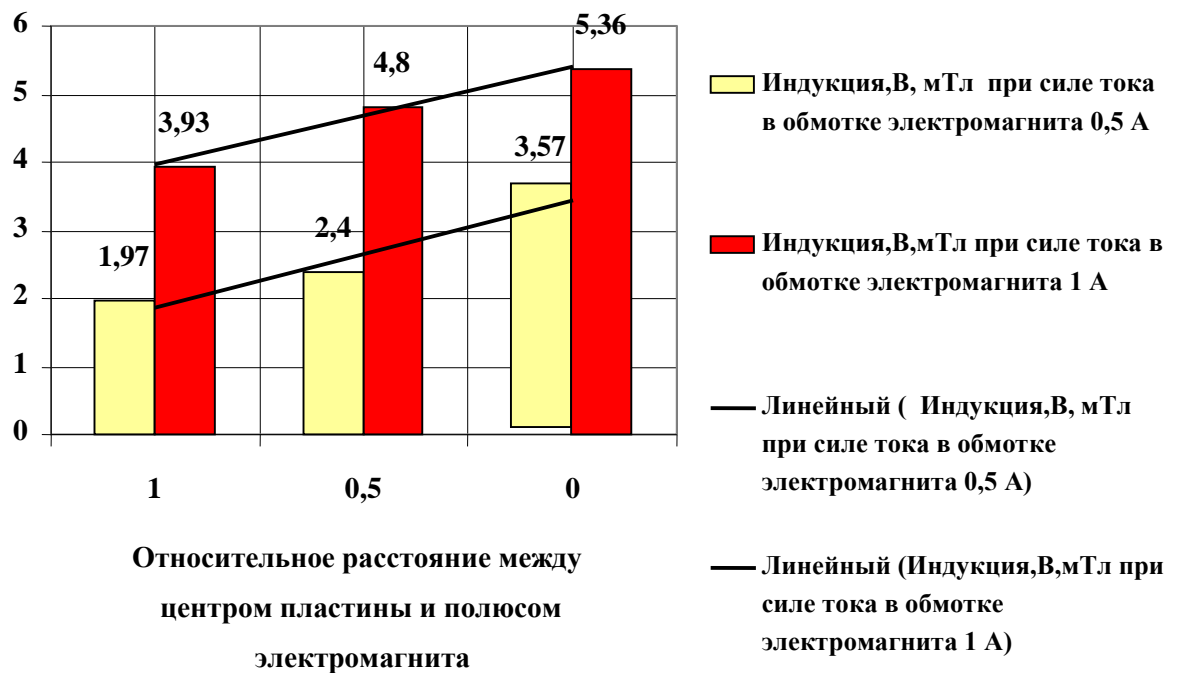


Рисунок 4.10 – Численные значения магнитной индукции на поверхностях металлических пластин, обратных установки магнитного устройства в направлении центр полюсной стойки электромагнита – центр пластины (толщиной 3 мм)



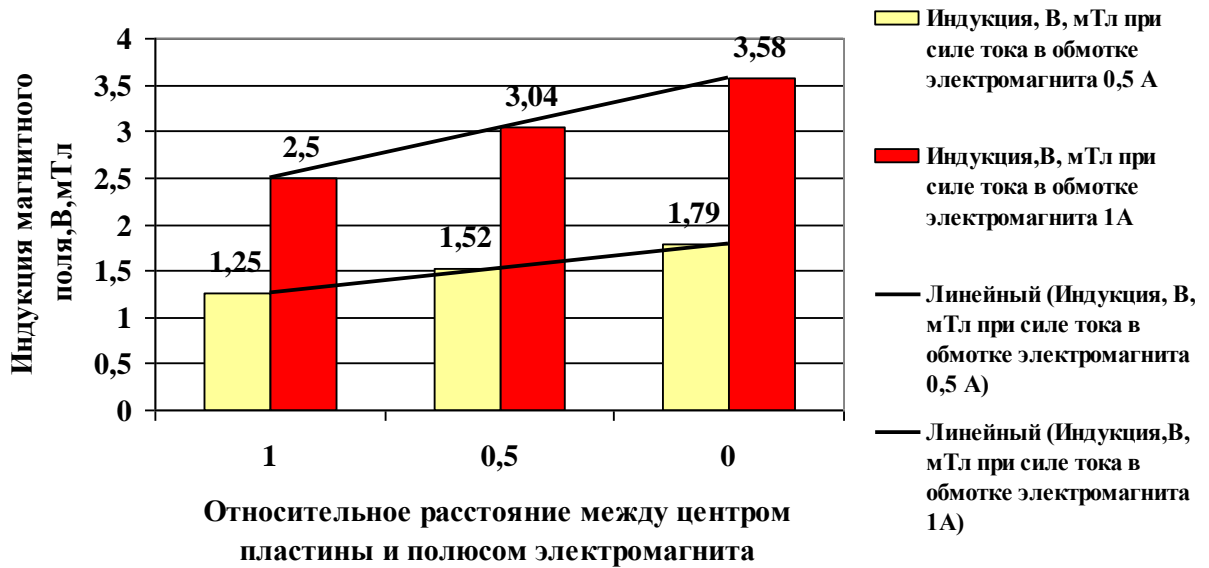


Рисунок 4.11 – Численные значения магнитной индукции на поверхностях металлических пластин, обратной установки магнитного устройства в направлении центр полюсной стойки электромагнита – центр пластины (толщиной 6 мм)

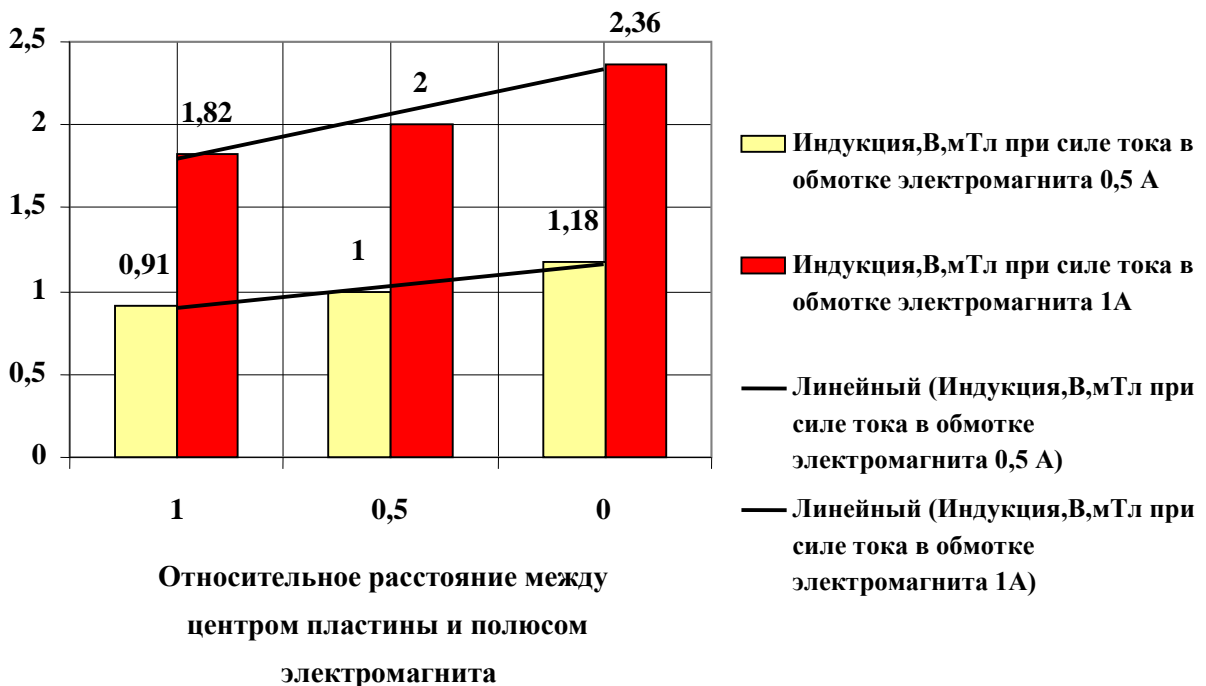


Рисунок 4.12 – Численные значения магнитной индукции на поверхностях металлических пластин, обратной установки магнитного устройства в направлении центр полюсной стойки электромагнита – центр пластины (толщиной 9 мм)

Результаты экспериментальных данных, приведенных на рисунках 4.10–4.12, позволяют сделать следующие выводы:

1. Предельные допустимые параметры индукции внешнего локального поля обеспечиваются магнитными устройствами, у которых обмотка электромагнита выполнена из провода ПЭВ диаметром 1,2 мм с числом витков не менее 1200.

2. Даже при условии создания тока в обмотке электромагнита 0,5 А, а это наиболее оптимальный параметр для активации воды и водных систем ЦКИМ (см. предыдущие разделы главы 4), магнитное устройство с указанной величиной силы тока способно создавать необходимое значение индукции магнитного поля для всех исследованных толщин металла, за исключением одной точки у металла толщиной 9 мм (см. рисунок 4.10).

3. Однако, учитывая, что в наиболее удаленной от полюсных стоек электромагнита точке по центру металла (в середине между ними) находится штуцер для нагнетания смесей ЦКИМ и то, что численное значение индукции 0,94 и 1,0 мТл величины приблизительно равнозначные, можно считать значение силы тока, равное 0,5 А, достаточным для создания внешнего локального магнитного поля и для металла толщиной 9 мм.

## **5 ТЕХНОЛОГИЯ ИНЪЕКЦИОННОГО УПЛОТНЕНИЯ БЕТОНА СМЕСЯМИ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ИНЪЕКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, АКТИВИРОВАННЫХ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ**

### **5.1 Механизмы трещинообразования в бетонных ограждающих конструкциях на контактных поверхностях бетон-бетон**

Основными местами затекания наружного воздуха с вредными загрязнителями (радиоактивными, химическими и биологическими веществами) в сборные и сборно-монолитные защитные сооружения являются трещины в стыках между железобетонными конструкциями и в зоне контакта бетона с металлическими изделиями защитно-герметичных входов и вводов инженерных коммуникаций [26, 15, 142, 27, 119, 120].

Известно, что при твердении на воздухе бетон уменьшает свой объем, в результате чего в нем возникает усадка. Для объяснения данного явления используют, в основном две теории (Михаэлиса и Фрейсине) [28].

Первая теория явление усадки объясняет физико-химическими процессами, сопровождающими схватывание и твердение в бетоне цементной матрицы. Согласно этой теории вначале цементная смесь представляет собой студнеобразную массу (гель), насыщенную водой с взвешенными в ней частицами негидратизированного цемента при начальном этапе кристаллообразования.

Затем начинается постепенный процесс твердения этой массы и превращение ее в цементный камень. Благодаря испарению части избыточной воды и поглощению другой ее части зернами цемента, вступающим в реакцию гидратации, гель постепенно обезвоживается и уплотняется. Вода в порах геля удерживается абсорбционными силами. Но, когда она испаряется и поглощается зернами цемента, эти силы освобождаются и стягивают твердеющую массу геля. В этот же период продукты гидратации цемента образуют кристаллы, которые, пронизывая массу геля, образуют твердеющий скелет цементного теста. Совокупное влияние этих двух

процессов вызывают в цементном камне, так называемые, объемные деформации усадки.

Вторая теория процесс усадки бетона объясняет только капиллярными явлениями, происходящими в тончайших микропорах цементного теста вследствие изменения влажности, как внутри пор теста, так и в окружающей среде. Поверхностное натяжение менисков в порах с водо-воздушной средой вызывает нормальные давления на стенки пор, которые и производят обжатие цементного камня в процессе его твердения.

На современном этапе объяснение усадки многие исследователи производят на основе обеих приведенных теорий, которые, в принципе, не исключают, а дополняют друг друга.

Рассмотрим реологические процессы, происходящие в бетонной массе полости стыка между двумя смежными сборными конструкциями из железобетона. Уже с первых часов твердения в бетоне возникают объемные деформации усадки, являющиеся причинами появления в нем напряжений растяжения. Непрерывное и длительное воздействие этих напряжений приводит к накоплению в бетоне обратных деформаций ползучести, которые в незначительной мере снижают деформации усадки. Таким образом, результирующие напряжения растяжения в бетоне являются функцией разности деформаций усадки и ползучести.

На упругой стадии работы материал, как известно, подчиняется закону Гука, который определяет некоторую зависимость растягивающих напряжений в бетоне от его модуля упругости, а также объемных деформаций усадки и ползучести:

$$\sigma_{bt} = (\varepsilon_{bmax} - \varepsilon'_{bmax}) E_{bt}, \quad (5.1)$$

где  $\sigma_{bt}$  - растягивающие напряжения в бетоне;  $(\varepsilon_{bmax} - \varepsilon'_{bmax})$  - разность максимальных объемных деформаций усадки и ползучести бетона;  $E_{bt}$  - модуль упругости бетона.

В связи с тем, что деформации ползучести возникают от постоянно действующей нагрузки, которой в бетонном заполнении полости вертикального стыка

практически нет, величиной  $\varepsilon_{b\max}$  можно пренебречь. В таком случае выражение (1.1) будет иметь вид:

$$\sigma_{bt} = \varepsilon_{b\max} E_{bt}, \quad (5.2)$$

Возрастающие результирующие растягивающие напряжения могут стать причиной возникновения трещин в бетонном заполнении полостей стыков между смежными железобетонными конструкциями при двух условиях, которые можно выразить следующими зависимостями:

$$\sigma_{bt} > R_t, \quad (5.3)$$

$$\sigma_{bt} > R_q, \quad (5.4)$$

где  $R_t$  – предел прочности бетона при растяжении, МПа;  $R_q$  – прочность бетона на сцепление с гранями сборной железобетонной конструкции, МПа.

Ситуации трещинообразования в бетонном заполнении полости вертикального стыка между сборными железобетонными панелями наружных стен сооружения отображена рисунке 5.1.

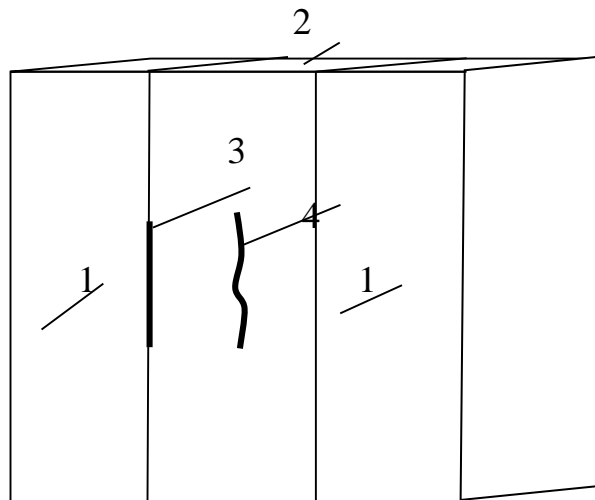


Рисунок 5.1 – Трещины от деформаций усадки бетона в полости вертикального стыка между стеновыми панелями: 1 – железобетонная панель; 2 – полость стыка между панелями, заполненная бетоном; 3 – трещина на контакте «бетон-бетон»; 4 – трещина в массиве бетонной шпонки стыка

Трещина 3 (рис. 5.1) может возникнуть в бетоне заполнения стыка в результате того, что растягивающие напряжения в бетоне превысят его прочность на

сцепления с гранью сборной конструкции, трещина 4 – в результате того, что растягивающие напряжения превысят прочность бетона на растяжение в бетонном массиве полости стыка.

Проанализируем вероятность возникновения указанных ситуаций, приведенных на рисунке 5.1.

Учитывая, что графические зависимости деформации усадки по утверждению Дишенгера являются показательными функциями затухающего типа и, принимая максимальную величину усадки бетона за определенный период (например, за год) за предельное значение, выражение (1.2) можно записать в следующем виде:

$$\sigma_{bt} = \left[ \varepsilon_{lim} (1 - e^{-\tau}) \right] E_{bt}, \quad (5.5)$$

Для вычисления модуля деформации бетона на растяжение воспользуемся формулой Графа, взятой из классических представлений о механических свойствах бетона и железобетона, пересчитанную для системы СИ [10]:

$$E_{bt} = \frac{100000}{1,7 + \frac{36}{R}}, \quad (5.6)$$

где  $R$  – прочность бетона на сжатие, МПа.

Предел прочности бетона при сжатии для любого возраста более суток, в свою очередь, можно определить по формуле Б.Г. Скрамтаева:

$$R = R_{28} \frac{\lg \tau}{\lg 28}, \quad (5.7)$$

где  $R_{28}$  – прочность бетона на сжатие в возрасте 28 суток, МПа.

Для определения предела прочности бетона при растяжении предлагается использовать общеизвестную зависимость:

$$R_{bt} = 0,23 \sqrt[3]{R_c^2} \quad (5.8)$$

Величина сцепления укладываемого встык бетона со старым бетоном или бетоном сборных конструкций по экспериментальным данным составляет примерно:

$$R_q = 0,045 \cdot R_c, \quad (5.9)$$

где  $R_q$  – предел прочности на сцепление с бетоном, МПа.

Таким образом, для оценки сплошности бетонной матрицы в стыке исходя из двух условий - (1.3) и (1.4), становятся известны все используемые данные и закономерности. В качестве примера разберем часто возникающий случай трещинообразования в бетоне. Допустим, при его прочности на сжатие в возрасте 28 суток  $R = 20$  МПа и ширине полости стыка 100 мм.

Сравнительные данные прочностных характеристик и растягивающих напряжений бетона в стыке, рассчитанные по формулам (5.5) – (5.9), и отображающие процесс трещинообразования приведены в таблице 5.1. и на рисунке 5.2.

Таблица 5.1 – Результаты расчета прочностных характеристик и напряжений растяжения бетона для предельной годовой усадки бетона  $\varepsilon_{\text{lim}} = 0,4 \cdot 10^{-3}$

Возраст, $\tau$ , год (сутки)	$(1 - e^{-\tau})$	Прочность бетона, МПа		Напряжения растяжения бетона, $\sigma_{bt}$	Ширина рас- крытия тре- щин, мм
		на сцепление, $R_q$	на растяжение, $R_{bt}$		
0,0137(5)	0,0040	0,44	1,04	0,03	0,16
0,0274(10)	0,0270	0,62	1,32	0,25	1,08
0,0548(20)	0,0530	0,81	1,57	0,57	2,12
0,082 (30)	0,0783	0,92	1,71	0,90	3,13
0,110 (40)	0,1040	1,00	1,86	1,20	4,16
0,137 (50)	0,1280	1,07	1,91	1,56	5,12
0,164 (60)	0,1520	1,10	1,96	1,88	6,08
0,192 (70)	0,1742	1,15	1,99	2,24	7,00

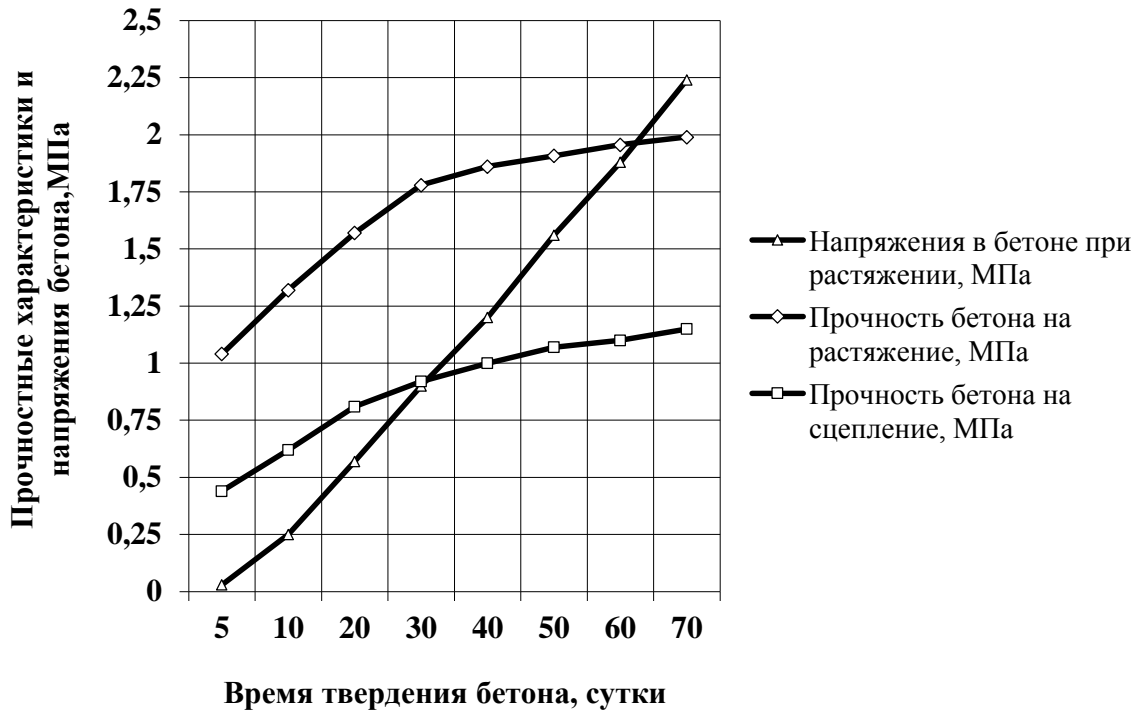


Рисунок 5.2 – Зависимость усадочных напряжений от прочности бетона в стыке на растяжение и сцепление от времени

О ширине раскрытия трещин в бетонной шпонке полости стыка можно рассуждать следующим образом. Совершенно очевидно, что отношение ширины раскрытия трещины  $a$ , к длине бетона  $\ell$ , подверженному деформации усадки (с учетом ползучести), соответствует величине предельной разности деформации усадки ( $\varepsilon_{\text{lim}}$ ).

То есть  $\frac{a}{\ell} = \varepsilon_{\text{lim}}$ . В таком случае, ширина раскрытия трещин с учетом деформаций усадки бетона во времени можно будет определять по формуле

$$a = \varepsilon_{\text{lim}} (1 - e^{-\tau}) \ell, \quad (5.10)$$

где  $a$  – ширина раскрытия трещины, мм;  $\ell$  – длина участка бетона в направлении деформации усадки, мм;  $\tau$  – время твердения бетона.

Анализ данных, приведенных в таблице 1.1 и на рисунке 1.2, позволяет сделать следующие выводы:

Величина результирующих растягивающих напряжений от объемных деформаций усадки и ползучести в тридцатидневном возрасте твердения бетона в стыке



превзойдет величину предела его прочности на сцепление с гранью железобетонной конструкции. В результате в бетоне на контакте «бетон-бетон» возникнет трещина. Указанная ситуация отображена на рисунке 5.1, на котором эта трещина обозначена цифрой 3.

В возрасте шестидесяти дней твердения и набора прочности бетона в полости стыка величина результирующих растягивающих напряжений превысит его прочность на растяжение и в массиве бетонной шпонки стыка в дополнение к первой трещине появится вторая. Данная трещина на рисунке 5.1. обозначена цифрой 4.

Трещины, о которых идет речь – усадочные поверхностные. Они ускоряют процесс обезвоживания бетона, в результате чего впоследствии возникают условия для все большего раскрытия трещин в стыке. Данный процесс, продолжающийся достаточно долгое время, значительно увеличивает воздухопроницаемость бетона стыка, а, следовательно, и ограждающей конструкции защитного сооружения в целом.

## **5.2 Механизмы трещинообразования в бетонных ограждающих конструкциях на контактных поверхностях металл-бетон**

В специальном строительстве трещины в объеме бетонных изделий на поверхностях, контактирующих с металлом закладных деталей входов и вводов инженерных коммуникаций, появляются в том случае, когда величина растягивающих напряжений от предельных деформаций усадки превысит величину сцепления бетона с металлом или величину его прочности на растяжение. Указанное условие трещинообразования может быть написано следующим образом:

$$\sigma_{bt} > R_{qa}, \quad (5.11)$$

$$\sigma_{bt} > R_t, \quad (5.12)$$

где  $R_{qa}$  – прочность бетона на сцепление с металлом, Па.

Для вычисления численного значения величины сцепления бетона с металлом ( $R_{qa}$ ) с учетом возраста бетона можно воспользоваться известной из классической теории железобетона зависимостью [10]:

$$R_{qa} = 0,0025R \quad (5.13)$$

Величину предела прочности бетона на растяжение, как было отмечено нами ранее, следует определять по формуле (5.8).

Численное значение величины растягивающих напряжений в бетоне на контакте с металлическими деталями можно определять таким же образом, как это делают при определении растягивающих напряжений в бетоне вокруг арматуры. Решения поставленной задачи для металлической закладной детали, несимметрично расположенной по оси бетонной призмы (рисунок 5.3), рассмотрена в работе [28]. Однако, предложенные в ней формулы для определения растягивающих напряжений в бетоне ( $\sigma_{bt}$ ) и сжимающих напряжений в металле ( $\sigma_a$ ), имеют достаточно сложный вид:

$$\sigma_a = E_a \cdot \varepsilon_a = \frac{E_a s}{1 + n \cdot \mu \left[ 1 + \left( \frac{c}{r} \right)^2 \right]}, \quad (5.14)$$

$$\sigma_{bt} = E_{bt} \cdot \varepsilon_{bt} = \frac{E_a s \mu \left[ 1 + \left( \frac{c}{r} \right)^2 \right]}{1 + n \cdot \mu \left[ 1 + \left( \frac{c}{r} \right)^2 \right]} (1 - e^{-\tau}) = \mu \left[ 1 + \left( \frac{c}{r} \right)^2 \right] \sigma_a (1 - e^{-\tau}), \quad (5.15)$$

где  $\sigma_a$ ,  $E_a$  - напряжения сжатия металла от усадки бетона и модуль упругости металла;  $\sigma_a$  - деформации в металле;  $s$  - деформации усадки бетона;  $n = \frac{E_a}{E_{bt}}$ ;  $\mu = \frac{A_a}{A_b}$ ;  $A_a$  - площадь поперечного сечения трубчатой металлической детали ввода инженерных коммуникаций в сооружение;  $A_b$  - площадь бетонного сечения;  $c$  - расстояние между центрами тяжести металла и бетона;  $r$  - радиус инерции бетонного сечения.

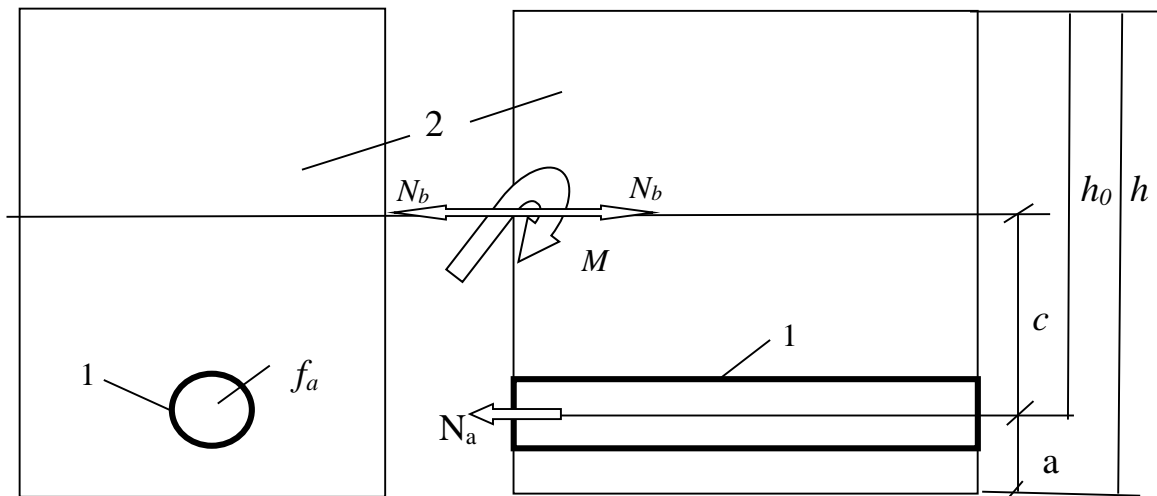


Рисунок 5.3 – Схема бетонной панели с металлической конструкцией трубчатого ввода инженерных коммуникаций в сооружение: 1 – трубчатый металлический ввод инженерных коммуникаций; 2 – бетонная часть сечения элемента

Формулы (5.14), (5.15) можно упростить в случае, когда железобетонные конструкции имеют прямоугольное сечения с учетом введения следующих дополнительных зависимостей:

$$r^2 = \frac{h^2}{12}, \quad (5.16)$$

$$c = \frac{h}{2} - a = (0,5 - z)h \text{ (рисунок 1.3)}, \quad (5.17)$$

где  $z = \frac{a}{h}$ .

В таком случае после соответствующих преобразований формулы (5.14) и (5.15) будут иметь более простой вид:

$$\sigma_a = \frac{E_a s}{1 + n\mu [1 + 12(0,5 - z)^2]}, \quad (5.18)$$

$$\sigma_{bt} = \mu [1 + 12(0,5 - z)^2] \cdot \sigma_a \cdot (1 - e^{-\tau}) \quad (5.19)$$

Для уточнения величины отношения модулей упругости металла и бетона  $n = \frac{E_a}{E_b}$  воспользуемся известной формулой, отображающей зависимость деформаций в металле и бетоне при их совместной работе

$$\varepsilon_a = \frac{s(1-\mu)}{1+(n-1)\mu} \quad (5.20)$$

В процессе экспериментальных исследований было установлено, что бетон после годичного твердения обнаружил усадку  $s=0,40$  мм/м ( $0,4 \cdot 10^{-3}$ ), а бетонная призма с металлической закладной деталью диаметром 44 мм ( $\mu=0,025\%$ ) показала деформацию  $0,25$  мм/м ( $0,25 \cdot 10^{-3}$ ). Используя зависимость, (1.20) произведем расчет величины отношения модулей упругости металла и бетона  $n = \frac{E_a}{E_b}$ :

$$0,25 \cdot 10^{-3} = \frac{0,50 \cdot 10^{-3}}{1+n \cdot 0,025}.$$

Откуда  $n=40$ .

Рассмотрим конкретный пример возникновения трещин в бетоне на контакте с металлом (труба диаметром 44 мм,  $\mu=0,025\%$ ) от годовой усадки бетона  $s=0,5 \cdot 10^{-3}$ , в случае, когда его предельная прочность на сжатие в возрасте 28 суток составляла 20 МПа. Дополнительные данные: модуль упругости металла  $E=2,1 \cdot 10^5$  МПа;  $n=40$ , размеры бетонного сечения (панели)  $3 \times 2$  м;  $z = \frac{0,5}{3} = 0,167$ .

Начальные сжимающие напряжения в металле и растягивающие в бетоне, рассчитанные по формулам (5.18) и (5.19), в этом случае будут равны:  $\sigma_a=25,3$  МПа,  $\sigma_{bt}=1,47$  МПа.

Сравнительные данные прочностных характеристик и растягивающих напряжений бетона, рассчитанные по вышеприведенным формулам и отображающие процесс трещинообразования в период твердения бетона по времени, для указанных исходных данных отображены в таблице 5.2. и на рисунке 5.4.

Для вычисления ширины раскрытия трещин на контакте металл-бетон воспользуемся известной зависимостью (5.10). Численные значения ширины раскрытия трещин на контакте «металл-бетон» также приведены в таблице. 5.2.

Таблица 5.2 – Данные расчета прочностных свойств и напряжений растяжения бетона на контакте с металлом для усадки бетона  $\varepsilon_{\text{lim}} = 0,4 \cdot 10^{-3}$

Возраст, $\tau$			Прочность бетона, МПа			Напряжения растяжения в бетоне, $\sigma_{\text{bt}}$	Ширина раскрытия трещин, $a_m$ , мм
сутки	месяц	год	на сжатие	на сцепление, с металлом $R_q$	на растяжение, $R_{\text{bt}}$		
10	0,333	0,027	13,82	1,34	1,32	0,46	0,283
20	0,667	0,055	17,98	1,70	1,57	0,93	0,487
30	1,000	0,082	20,00	1,91	1,71	1,37	0,632
40	1,333	0,110	22,14	2,06	1,86	1,82	0,736
50	1,667	0,137	23,48	2,17	1,91	2,25	0,811
60	2,000	0,164	24,58	2,25	1,96	2,65	0,865
70	2,333	0,192	25,50	2,32	1,99	3,07	0,903
80	2,667	0,219	26,30	2,38	2,03	3,46	0,931
90	3,000	0,247	27,00	2,44	2,06	3,84	0,950

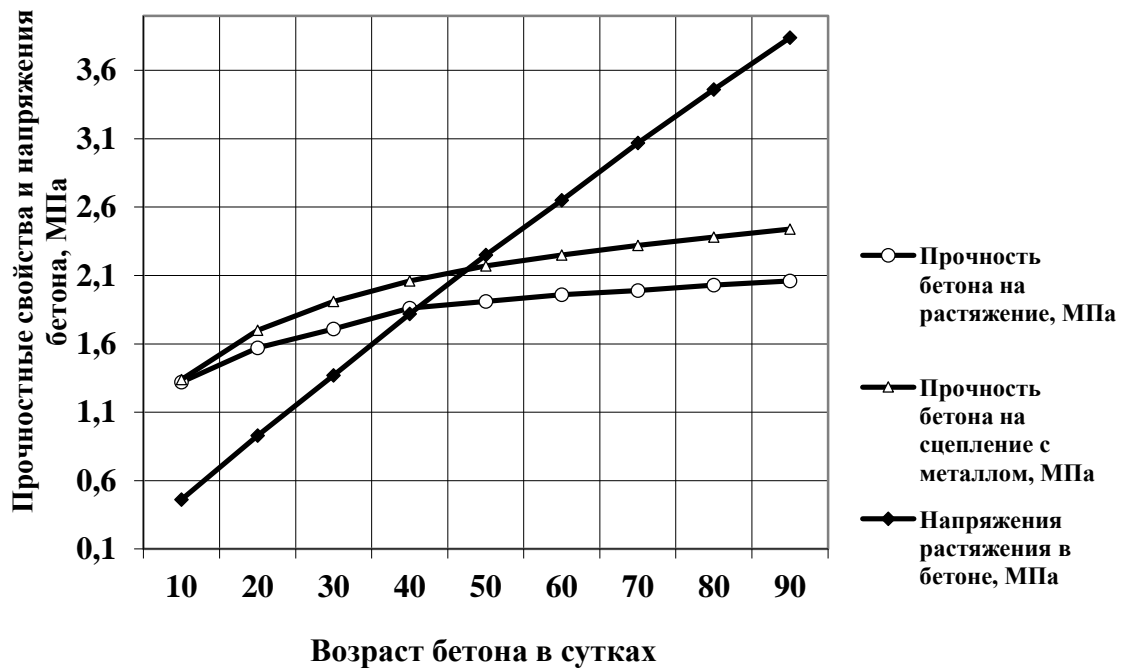


Рисунок 5.4 – Прочностные свойства и растягивающие напряжения в бетоне на контакте с металлом в результате усадочных деформаций при его твердении

На рисунке 5.5 показан конкретный случай образования трещин в бетоне на контакте с металлическими деталями конструкций, смоделированных в процессе экспериментальных исследований.

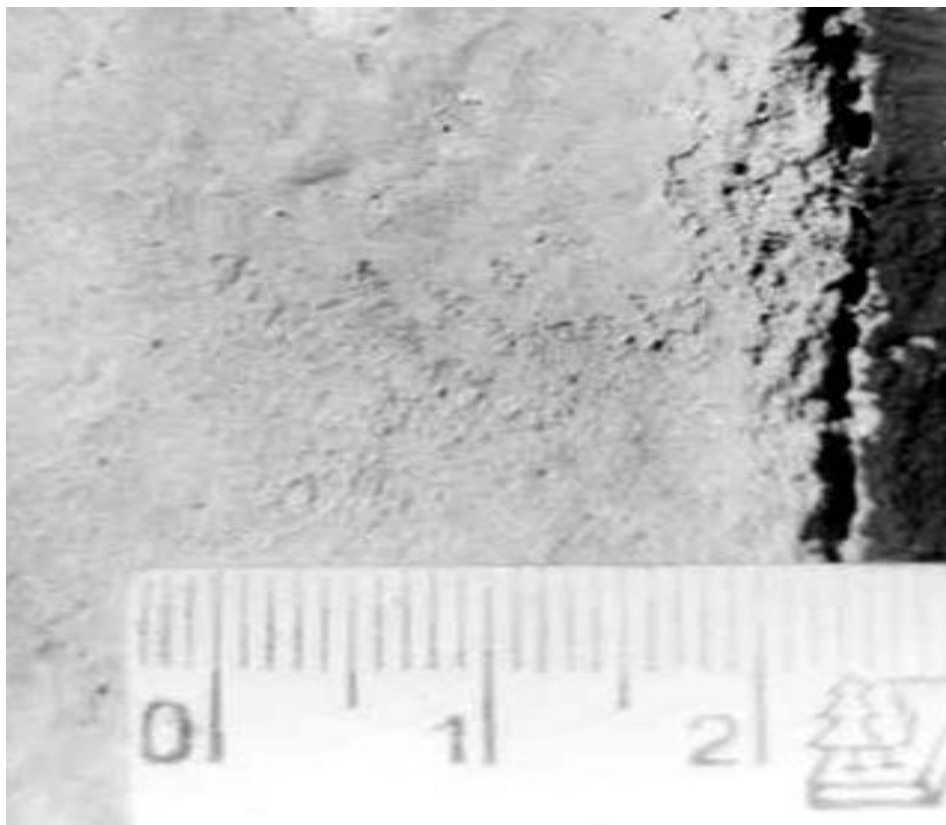


Рисунок 5.5 – Трещина в бетоне на контакте с металлом в опытных образцах

Приведенные выше данные расчета и экспериментальных исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. Процесс твердения бетона сопровождается трещинообразованием (в нашем случае на сороковые и пятидесятые сутки) в момент, когда под воздействием деформаций усадки величина напряжений растяжения становится выше его предельной прочности на растяжение или сцепления с металлом (рисунок 5.4).

2. Появление трещин (с шириной раскрытия в нашем случае 0,736 и 0,811 мм соответственно), вызванных процессами уменьшения в объеме бетона на контакте с металлом закладной детали, с течением времени сопровождается все большим их увеличением в длину, что приводит к повышенной газо- (воздухо-) проницаемости.

### **5.3 Особенности технологии инъекционного уплотнения мест контакта металл-бетон смесями, активированными магнитным полем**

Тампонажным работам по инъекционному уплотнению трещин в железобетонных изделиях в защитном сооружении предшествуют предварительная проверка воздухопроницаемости ограждающих конструкций по внешнему контуру герметизации и испытание сооружения на герметичность по методикам, изложенным в нормативном ведомственном документе ВСН – 166-91 МО РФ и других научных и литературных источниках [46, 104, 103, 105, 143, 148, 106, 159, 137, 47, 107, 108, 184].

После определения дефектных мест в процессе испытания сооружения на герметичность, организуются тампонажные работы по заделке трещин. В соответствии с многочисленными рекомендациями в трещины на контакте металл-бетон в ограждающих конструкциях нагнетаются тампонажные смеси. Нагнетание производится двумя импульсами по 30 секунд при начальном рекомендуемом давлении 200 кПа. В дальнейшем давление может быть снижено до 150–170 кПа. Обязательным условием инъекционного уплотнения трещин в бетоне ограждающих конструкций на контакте с металлом смесями ЦКИМ с активированными водными системами, является использование в процессе тампонажных работ специальных магнитных устройств, либо в виде систем оксидно-бариевых магнитов 16 БА-190 и 25 БА-250 со стальными полюсниками, либо специальных электромагнитных устройств с селеновыми выпрямителями и контрольными приборами для определения индукции магнитного поля и силы тока в обмотке электромагнита, а также в дефектном месте - на контакте бетона с металлом. Для двухэтапной импульсной обработки воды и водно-цементных смесей ЦКИМ наиболее применимы специальные магнитные устройства по патенту РФ № 2550712 (патентообладатель ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», авторы Бочарников А.С. и Гончарова М.А.) и а. с. № 250580 СССР [179, 134]. В качестве нагнетательных устройств могут быть специальные шприцы, нагнетательные вакуум-камеры с компрессорными установками (рисунок 5.6).

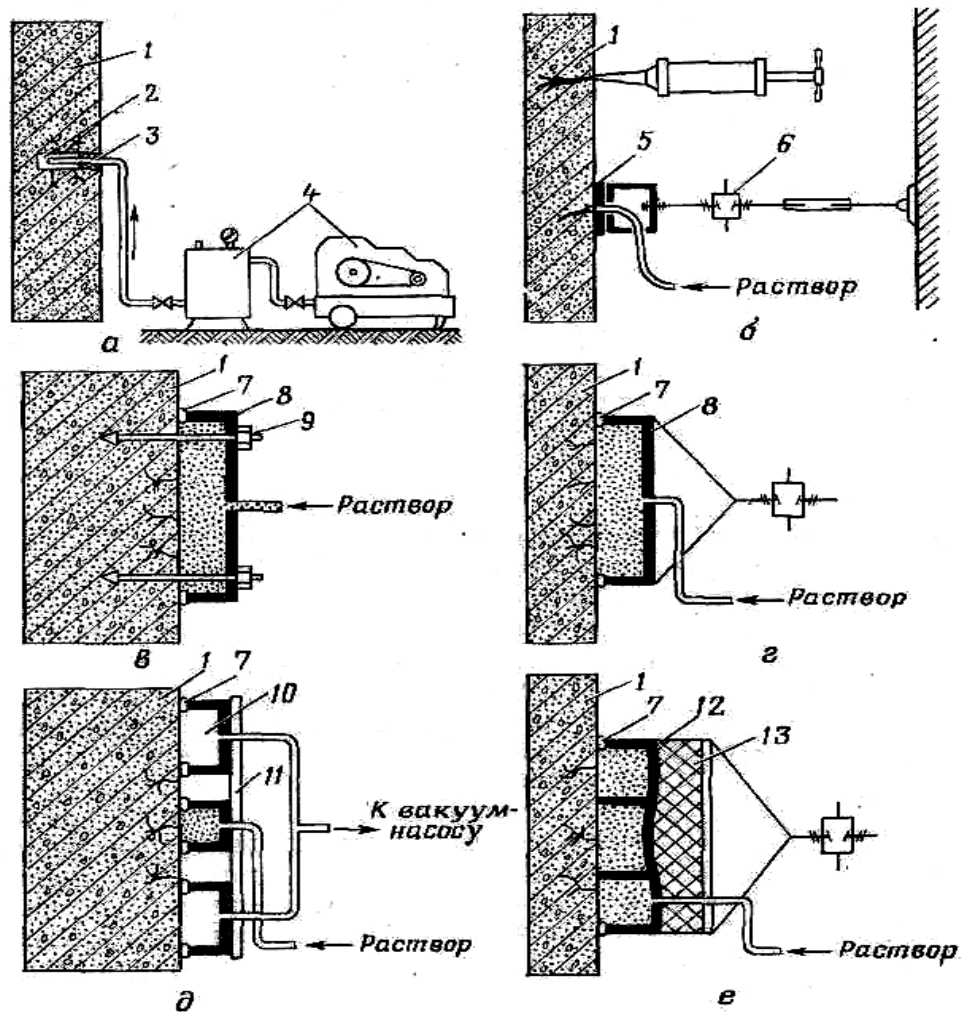


Рисунок 5.6 – Устройства для инъекционного уплотнения трещин в бетоне ограждающих конструкций сооружений: точечные: а – иньектор; б – шприц и наконечник с телескопическим упором; площадные: в – жесткая прижимная камера с креплением анкерами; г – жесткая прижимная камера с телескопическим упором; д – камера нагнетания, удерживаемая камерами разрежения; е – эластичная прижимная камера с телескопическим упором; 1 – герметизируемая конструкция; 2 – скважина; 3 – иньектор; 4 – система нагнетания раствора; 5 – насадка; 6 – телескопический упор; 7 – герметик; 8 – прижимная камера; 9 – анкера; 10 – камера разряжения; 11 – распределительная плита; 12 – эластичная камера; 13 – эластичный элемент

Нагнетание активированных смесей ЦКИМ в трещины производят через специальные штуцера, равномерно установленные на металлических закладных деталях защитно-герметичных входов и вводов инженерных коммуникаций или с по-



мощью специальных устройств-инъекторов [46, 179, 32, 33, 146, 184]. Между смежными штуцерами устанавливают, например, стойки П-образного электромагнита специального устройства активации водных систем смесей ЦКИМ [179]. Нагнетание смесей производится последовательно снизу-вверх, начиная с самого нижнего штуцера. В штуцер смесь ЦКИМ закачивается до тех пор, пока она не станет вытекать через смежный вышележащий штуцер. Затем магнитное устройство переставляется между другими смежными штуцерами и процесс нагнетания продолжается. После набора ЦКИМ необходимой прочности производится оценка качества тампонажных работ по методике, изложенной в главе 2. Предельно-допустимые значения воздухопроницаемости дефектных мест приведены в главе 3 данной диссертации.

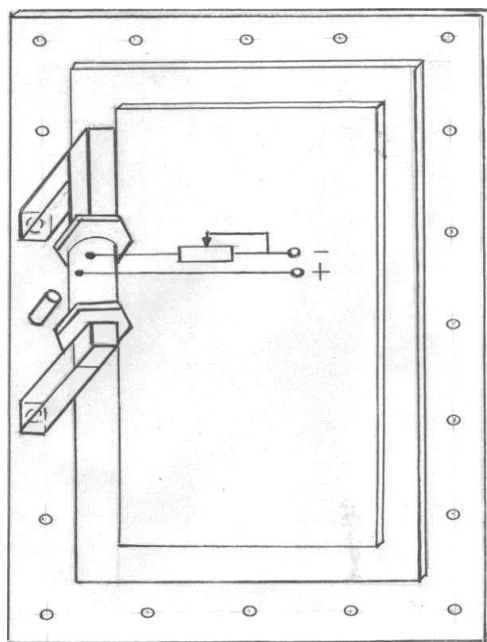


Рисунок 5.7 – Устройство для нагнетания в трещины на контакте металл-бетон магнитореологических ЦКИМ: 1 – металлическая закладная деталь защитно-герметической двери (комингс); 2 – электромагнитное устройство для создания локального магнитного поля; 3 – штуцер для нагнетания смесей ЦКИМ в трещины бетона на контакте с металлом; 4 – отверстия для установки штуцеров; 5 – источник постоянного тока

#### **5.4 Теоретические предпосылки и анализ результатов данных экспериментальных исследований воздухопроницаемости ЦКИМ как параметра оценки качества тампонажных работ**

Качество тампонажных работ по заделке трещин в ограждающих конструкциях защитных сооружений и в стыках крупнопанельных зданий можно оценивать по газопроницаемости материалов, например, способом прокачивания через эти материалы воздуха (за счет создания избыточного давления с одной стороны конструкции).

Движение воздуха через ограждающие строительные конструкции зданий и сооружений происходит через поры и трещины материала в процессе перепада давления за счет ветрового или температурного подпора. При этом газопроницаемость материалов характеризуется следующими механизмами переноса:

- молекулярной диффузией (при радиусе максимальных пор до  $10^{-7}$  м);
- молекулярным кнудсеновским потоком (при радиусе пор от  $10^{-7}$  до  $10^{-6}$  м);
- вязкостным пуазейлевским потоком (при радиусе пор более  $10^{-6}$  м) [164].

Преобладающим в переносе газов через ограждающие конструкции зданий и сооружений является вязкостный поток.

В общем случае движение газа в пористой среде ограждающих конструкций зданий и сооружений описывается нелинейным дифференциальным уравнением параболического типа

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = \frac{m\mu}{cnp} \frac{\partial P}{\partial t}, \quad (5.21)$$

где  $P = p^{\frac{n+1}{n}}$  – функция давления;  $p$  – абсолютное давление газа;  $n$  – показатель политропы в уравнении состояния газа (при изотермическом процессе  $n=1$ );  $m$ ,  $c$  – соответственно, пористость и коэффициент проницаемости среды;  $\mu$  – динамическая вязкость газа;  $x, y, z$ ,  $t$  – пространственные и временная координаты.

Решения частных случаев производят интегрированием уравнения (5.21) с соответствующими начальными и граничными условиями. При стационарном процессе, когда давление во времени не изменяется и правый член уравнения равен

нулю, уравнение переходит в уравнение Лапласа. При этом массовый расход газа ( $M$ ) через пористую среду в направлении оси  $x$  через площадь конструкции  $A$  будет равен

$$M = -\frac{cn}{\mu\beta(1+n)} \frac{\partial P}{\partial x} A, \quad (5.22)$$

где  $\beta = \frac{p_a}{\rho_a}$  – постоянная;  $p_a, \rho_a$  – соответственно, атмосферное давление и плотность газа при этом давлении.

Для одномерного изотермического движения газа при стационарном процессе решение уравнения (4.1), имеет вид

$$p^2 = \frac{x}{h} (p_2^2 - p_1^2) + p_1^2, \quad (5.23)$$

где  $h$  – толщина среды в направлении движения газового потока;  $p_1$  и  $p_2$  – давление газа на границах пористой среды, соответствен при  $x=0$  и  $x=h$ .

Массовый расход газа через пористую среду площадью  $A$  в этом случае будет равен

$$M = \frac{c}{2\mu\beta} \frac{p_1^2 - p_2^2}{h} A. \quad (5.24)$$

Если на одной из границ среды давление равно атмосферному, а на другой незначительно превышает его, то массовый расход газа можно определить по упрощенной формуле

$$M = \frac{c\rho_a}{\mu} \frac{\Delta p}{h} A, \quad (5.25)$$

$\Delta p$  – перепад давления на границах среды (на наружной и внутренней поверхностях конструкции).

Объемный расход газа ( $Q$ ), отнесенный к атмосферному давлению, в этом случае будет равен

$$Q = \frac{c}{\mu} \frac{\Delta p}{h} A. \quad (5.26)$$

Для воздуха, например, при температуре  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  и перепаде давления 1 мм вод. ст., равного 9,81 Па (даПа) массовый ( $M$ , кг/с) и объемный ( $Q$ , м<sup>3</sup>/с) расходы могут быть определены по следующим соответствующим зависимостям:

$$M = 7,4 \cdot 10^5 \frac{cA}{h}; \quad (5.27)$$

$$Q = 5,7 \cdot 10^5 \frac{cA}{h}. \quad (5.28)$$

Перепад давления (подпор) газа в помещении, ограниченном пористой средой, если первоначальное давление внутри помещения более (или менее) атмосферного, а внешнее давление постоянно равно атмосферному, описывается следующим приближенным уравнением

$$\Delta p = \Delta p_0 e^{-\frac{c\rho_a}{\mu} \frac{At}{Vh}}, \quad (5.29)$$

где избыточное давление воздуха в помещении в момент времени  $t$ ;  $\Delta p_0$  – первоначальное избыточное давление воздуха в момент времени  $t=0$ ;  $A$  – площадь ограждающей конструкции (пористой среды);  $V$  – объем помещения (внутреннего пространства сооружения).

Массовый расход газа в момент времени  $t$  может быть вычислен по формуле:

$$M = \frac{c\rho_a}{\mu} \frac{A}{h} \Delta p e^{-\frac{c\rho_a}{\mu} \frac{At}{Vh}}, \quad (5.30)$$

а общая массовая утечка газа из помещения (сооружения) через ограждающие конструкции за время  $t$  будет соответственно равна:

$$M_{\text{общ}} = \rho_a V \frac{\Delta p_0}{\rho_a} (1 - e^{-\frac{c\rho_a}{\mu} \frac{At}{Vh}}). \quad (5.31)$$

Предварительные экспериментальные исследования позволили определить зависимость между проницаемостью  $c$  и шириной раскрытой сквозной трещины, которая описывается следующей формулой

$$c = \frac{\sum a_i^3}{5\ell}, \quad (5.32)$$

где  $a_i$  – ширина трещины, м;  $\ell$  – протяженность элемента ограждающей конструкции с трещиной, м.

Коэффициент воздухопроницаемости может быть определен через проницаемость  $c$  с учетом его динамической вязкости  $\mu$  по следующей зависимости

$$k_g = \frac{c}{\mu},$$

где  $c$  – коэффициент проницаемости;  $k_g$  – коэффициент воздухопроницаемости, кг/(м<sup>2</sup>·ч·мм вод.ст.).

Физическая сущность этого коэффициента есть не что иное, как масса воздуха, проникающая через 1 м<sup>2</sup> площади материала конструкции за один час, при перепаде давления по обеим сторонам конструкции равном 1 мм вод.ст. (1 даПа).

Данные экспериментальных исследований позволили также установить объемный расход воздуха ( $Q$ , м<sup>3</sup>/с) через одиночную трещину в конструкции (при ламинарном движении воздуха), который может быть вычислен с помощью следующей формулы

$$Q = 0,013 \frac{a^3 b \Delta p}{\mu h \omega}, \quad (5.33)$$

где  $a$  – ширина трещины, м;  $b$  – длина трещины, м;  $\Delta p$  – перепад давления, Па;  $\mu$  – динамическая вязкость воздуха, Па·с;  $h$  – толщина конструкции, м;  $\omega$  – коэффициент шероховатости стенок трещины, определяемый по графической зависимости, приведенной на рисунке 5.8.

При этом коэффициент проницаемости стыков, замоноличенных цементными тампонажными смесями, может определяться по зависимости:

$$c_c = \frac{Q \mu h}{a \Delta p}. \quad (5.34)$$

где  $Q$  – объемный расход газа через трещину в стыке шириной  $a$  при перепаде давления  $\Delta p$ , м<sup>3</sup>/с;  $h$  – толщина конструкции, м.

Проведенные в процессе основных экспериментальных исследований оценки воздухопроницаемости тампонажных составов ЦКИМ по методике, изложенной в главе 2, дали следующие результаты (таблица 5.3).

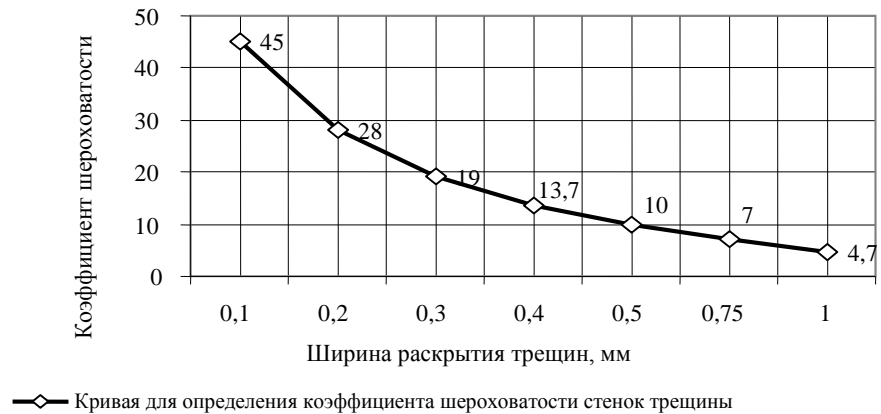


Рисунок 5.8 – Кривая для определения коэффициента шероховатости в зависимости от ширины раскрытия трещины

Таблица 5.3 – Результаты оценки воздухопроницаемости мест заделки трещин на контакте металл-бетон смесями ЦКИМ

№ п/п	Состав ЦКИМ в частях по массе				В, мТл	I, А	t, с	Коэффициент воздухопроницаемости, $k_g$ , кг/(м <sup>2</sup> ·ч·даПа)	Сопротивление воздухопроницанию, $R_g$ , (м <sup>2</sup> ·ч·даПа)/кг	Коэффициент эффективности, $k_3$
	Цемент	Песок	Наполнитель (шлак)	Вода						
1	1	-	0,1	0,50	0,38	0,50	60	$3,98 \cdot 10^{-3}$	251,19	1,36
2					-	-	-	$5,40 \cdot 10^{-3}$	185,25	
3		-	0,1	0,75	0,38	0,50	60	$5,06 \cdot 10^{-3}$	197,79	1,33
4								$6,71 \cdot 10^{-3}$	149,05	
5		2	0,1	0,48	0,38	0,50	60		275,23	1,29
6					-	-	-		213,36	

Данные, приведенные в таблице 5.3, позволяют сделать следующие выводы:

- магнитная обработка систем твердения с ферромагнитным наполнителем позволяет снизить воздухопроницаемость ЦКИМ в пределах от 29 до 36 %;
- полученные численные значения коэффициентов воздухопроницаемости основных составов ЦКИМ с установленными параметрами магнитной обработки

водных систем ЦКИМ могут служить ориентировочными данными для оценки качества тампонажных работ по уплотнению трещин в железобетонных конструкциях защитных сооружений на контакте металл-бетон.

### **5.5 Технико-экономическая эффективность тампонажных работ по инъекционному заполнению трещин в железобетонных конструкциях**

Расчет технико-экономической эффективности может быть произведен по разнообразным методикам [141, 52, 114, 4].

Технико-экономическая эффективность использования магнитных цементных композиционных инъекционных материалов (ЦКИМ) с двухэтапной магнитной обработкой воды и водно-цементных систем определялась путем сравнения базового и предлагаемого вариантов. Варианты отличались только составами, расходные материалы которых приведены в таблицах 5.4 и 5.5.

Расчетные данные количества расходных материалов на  $1\text{ м}^3$  смеси были определены на основе известного закона водоцементного отношения, в соответствии с которым расчет предела прочности магнитных ЦКИМ на сжатие производился по формуле:

$$\frac{M_u}{M_g} = \frac{R_b}{AR_u} + \frac{0,8}{A}, \quad (5.35)$$

где  $\frac{M_u}{M_g}$  – цементно-водное отношение;  $R_b$  – предел прочности ЦКИМ на сжатие;

$R_u$  – активность цемента;  $A$  – коэффициент, характеризующий степень магнитной обработки:  $A_1=0,7$  (одноэтапная обработка воды);  $A_2=0,8$  (двухэтапная обработка: воды и водоцементных смесей).

Таблица 5.4 – Исходные материалы и параметры, характеризующие базовый и предлагаемый варианты на 1 л воды (на 1000 см<sup>3</sup>)

№№ п/п	Показатели	Единица измерения	Варианты	
			Базовый	Предлагаемый
1.	Вода, масса (М <sub>в</sub> )	кг	1	1
2.	Вода, объем (V <sub>в</sub> )	л/см <sup>3</sup>	1/1000	1/1000
3.	Цемент, масса (М <sub>ц</sub> )	кг	2,22	2,00
4.	Водоцементное отношение (М <sub>в</sub> /М <sub>ц</sub> )	-	0,45	0,50
5.	Цементно-водное отношение (М <sub>ц</sub> /М <sub>в</sub> )	-	2,22	2,00
6.	Тонкомолотый конвертерный шлак, масса (М <sub>д1</sub> )	кг	0,22	0,20
7.	Суперпластификатор СП-3, масса (М <sub>д2</sub> )	кг	0,022	-
8.	Масса бетонной смеси (М <sub>бс</sub> )	кг	2,77	2,46
9.	Объем бетонной смеси (V <sub>бс</sub> )	см <sup>3</sup>	1398	1400
10.	Плотность бетонной смеси ρ <sub>бс</sub>	кг/м <sup>3</sup>	1981	1757

Таблица 5.5 – Расходные материалы ЦКИМ по вариантам на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси

№№ п/п	Расчетные формулы и расходные материалы	Единица измере- ния	Варианты	
			Базовый	Предлагае- мый
1.	<p>Расход цемента (масса цемента – М<sub>ц</sub>)</p> $M_{\text{ц}} = \frac{\gamma_{\text{бс}}}{1 + \frac{M_{\text{в}}}{M_{\text{ц}}} + \frac{M_{\text{д1}}}{M_{\text{ц}}} + \frac{M_{\text{д2}}}{M_{\text{ц}}}}.$ <p><math>M_{\text{ц1}} = \frac{1981}{1,56} = 1269,87; M_{\text{ц2}} = \frac{1757}{1,6} = 1098,13.</math></p>	кг	1269,87	1098,13
2.	<p>Расход воды (М<sub>в</sub>)</p> $M_{\text{в}} = M_{\text{ц}} \cdot \frac{M_{\text{в}}}{M_{\text{ц}}}.$ <p><math>M_{\text{в1}} = 1269,87 \cdot 0,45 = 571,44; M_{\text{в2}} = 1098,13 \cdot 0,5 = 549,06.</math></p>	кг(л)	571,44	549,06
3.	<p>Расход тонкомолотого конвертерного шлака (М<sub>д1</sub>)</p> $M_{\text{д1}} = M_{\text{ц}} \cdot \frac{M_{\text{д1}}}{M_{\text{ц}}}.$ <p><math>M_{\text{д1}} = 1269,87 \cdot 0,1 = 126,99;</math>  <math>M_{\text{д2}} = 1098,13 \cdot 0,1 = 109,81.</math></p>	кг	126,99	109,81
4.	<p>Расход суперпластификатора СП-3 (М<sub>д3</sub>)</p> $M_{\text{д3}} = M_{\text{ц}} \cdot \frac{M_{\text{д3}}}{M_{\text{ц}}}.$ <p><math>M_{\text{д3}} = 1269,87 \cdot 0,01 = 12,7.</math></p>	кг	12,70	-



В таблице 5.6 приведены сравнительные прочностные и другие показатели для ЦКИМ по вариантам. При этом численные значения предела прочности ЦКИМ по вариантам были определены по формуле (5.35).

Для расчета экономической эффективности автор использовал известную формулу:

$$\mathcal{E} = [(C_1 + E_n \cdot K_1) - (C_2 + E_n \cdot K_2)] \cdot V, \quad (5.36)$$

где  $\mathcal{E}$  – экономический эффект, руб.;  $C_1$ ,  $C_2$  – себестоимость тампонажных работ по заделке трещин с использованием ЦКИМ по вариантам (базовый и предлагаемый), руб.;  $E_n$  – нормативный коэффициент эффективности;  $K_1$ ,  $K_2$  – удельные капитальные вложения;  $V$  – объем инвестиций, руб.

Таблица 5.6 – Прочностные и другие показатели ЦКИМ по вариантам: базовый и предлагаемый

№№ п/п	Показатели	Единица измерения	Варианты	
			Базовый	Предлагаемый
1.	Активность цемента, $R_{ц}$	МПа	45	45
2.	Коэффициент, характеризующий степень магнитной обработки для формулы (4.1): одноэтапной для базового варианта ( $A_1$ ) и двухэтапной для предлагаемого варианта ( $A_2$ )	-	0,7	0,8
3.	Предел прочности ЦКИМ на сжатие, $R_b$	МПа	34	36
4.	Коэффициент воздухопроницаемости, $k_g$	кг/(м <sup>2</sup> ·ч·даПа)	$5,40 \cdot 10^{-3}$	$3,98 \cdot 10^{-3}$
5.	Соппротивление воздухопроницанию, $R_g$	(м <sup>2</sup> ·ч·даПа)/кг	185,25	251,1

Учитывая, что предлагаемый вариант не требует дополнительных капитальных вложений ( $K_1=K_2$  и  $E_n K_1 = E_n K_2$ ), расчет экономического эффекта был произведен по формуле:

$$\mathcal{E} = (C_1 - C_2) \cdot V. \quad (5.37)$$

Себестоимость работ по вариантам определялась с учетом трех составных элементов по следующей формуле

$$C_i = ПЗ_i + НР + ПП, \quad (5.38)$$

где ПЗ – прямые затраты (стоимость материалов, работы машин, механизмов и заработной платы по трудозатратам), руб.; НР – накладные расходы (18 % от прямых затрат), руб.; ПП – плановая прибыль (6 % от ПЗ+НР).

Численные значения себестоимости работ и их составляющие элементы по вариантам приведены в таблице 5.7.

При этом экономический эффект на 1 м<sup>3</sup> ЦКИМ, рассчитанный по формуле (4.3) с учетом (4.4) и данных, приведенных в таблице 5.5, будет равен

$$\mathcal{E} = (25642,40 - 22553,55) \cdot 1 = 3088,85 \text{ руб.}$$

Таким образом, при более высокой прочности ЦКИМ и меньшей газопроницаемости (то есть при более качественной инъекционной заделке трещин в бетоне ограждающих конструкций сооружений) применение предлагаемого варианта состава ЦКИМ дает экономический эффект 3088,85 руб. на 1 м<sup>3</sup> тампонажной смеси.

Таблица 5.7 – Затраты по вариантам: базовый и предлагаемый

№ № п/п	Затраты	Еди- ница изме- рения	Цена, р.	Обоснование объема (коли- чества)	Варианты			
					Базовый		Предлагаемый	
					Коли- чество во	Сумма	Коли- чество во	Сумма
1. Материалы		-	-		-	10171,8	-	7702,3
1.	Цемент	кг	5-00	таблица 4.2	1269,9	6349,5	1098,1	5490,5
2.	Тонкомолотый конвертерный шлак	кг	20-00	таблица 4.2	127,0	2540,0	110,0	2200
3.	Суперпластификатор СП-3	кг	100-00	таблица 4.2	12,7	1270,0	-	-
4.	Вода	м <sup>3</sup>	21-48	таблица 4.2	0,571	12,3	0,549	11,8
2. Электроэнергия		кВт-час	3-21	СНиП IV-2-82, гл. 2. Приложение т.1. § 47	0,31	1,0	0,31	1,0
3.Работа механизмов и оборудования		маш- час	6000		0,62	3720,0	0,62	3720,0
4. Затраты труда		чел-час	5900		1,12	6608,0	1,12	6608,0
Итого: прямые затраты(ПЗ)						20500,8		18031,3
Накладные расходы (НР=0,18 ПЗ)						3690,14		3245,63
Плановая прибыль (ПП=0,06(ПЗ+НР)						1451,46		1276,62
Себестоимость, всего						25642,40		22553,55

### **Заключение**

Проблема герметизации вертикальных стыков крупнопанельных зданий и ограждающих конструкций для исключения затекания в их внутреннее пространство загрязненной воздушной среды и влаги, может быть решена за счет насыщения матриц тонкодисперсными ферромагнитными наполнителями и оптимизирующего воздействия на них параметров локального магнитного поля. Установлено, что наиболее эффективно использование в качестве наполнителя конвертерных шлаков.

Путем разработки новых составов эффективных цементных композиционных инъекционных материалов (ЦКИМ) можно улучшить прочностные, реологические и адгезионные свойства систем твердения.

Таким образом, полученные в процессе экспериментальных исследований данные о воздухопроницаемости материалов, а также приведенные разработанные теоретические положения, определяющие зависимости между разными параметрами оценки воздухопроницаемости материалов, позволяют утверждать, что инженерные решения по организации и осуществлению тампонажных работ по заделке узких трещин в бетонных конструкциях с помощью ЦКИМ являются оптимальными.

### **Итоги выполненного исследования**

1. Получены результаты теоретических и экспериментальных исследований, обосновывающие возможность использования ферромагнитных наполнителей из отходов производств в виде тонкомолотого конвертерного шлака и продуктов обработки металлов абразивными материалами для создания эффективных структурированных цементных композиционных инъекционных материалов (ЦКИМ), активированных двухэтапной магнитной обработкой воды и водно-цементных систем, с требуемыми прочностными и реологическими свойствами для качественного инъекционного уплотнения трещин на поверхности раздела «бетон-бетон» в стыках крупнопанельных зданий и «металл-бетон» в железобетонных ограждающих конструкциях защитных сооружений специального строительства.

2. Созданы оптимальные составы ЦКИМ, активированные двухэтапной магнитной обработкой воды и водно-цементных систем для эффективной инъекционной заделки узких и широких трещин в железобетонных конструкциях зданий и сооружений.

3. Определена магнитная проницаемость металлов конструкций защитно-герметических входов и вводов инженерных коммуникаций защитных сооружений (ЗС) толщиной 0,6–1,0 см при воздействии на них внешнего локального магнитного поля от специального источника – технологического магнитного устройства (патент РФ № 2550712, 2015 г.).

4. Определена магнитная восприимчивость смесей составов ЦКИМ, активированных двухэтапной магнитной обработкой (воды и водно-цементных систем смесей) для инъекционного уплотнения узких и широких трещин в железобетонных конструкциях.

5. Установлены граничные параметры внешнего локального магнитного поля и давления нагнетания тампонажных смесей ЦКИМ, активированных двухэтапной магнитной обработкой для инъекционной заделки узких и широких трещин в железобетонных конструкциях на контактных поверхностях «металл-бетон» и «бетон-бетон».

6. Разработана технология инъекционного уплотнения трещин на поверхности раздела «металл-бетон» в железобетонных конструкциях ЗС и «бетон-бетон» в вертикальных стыках крупнопанельных зданий и сооружений составами ЦКИМ, активированными двухэтапной магнитной обработкой под воздействием внешнего локального магнитного поля на основе выполненного анализа процесса трещинообразования в бетоне на контактных поверхностях «металл-бетон» в местах установки в железобетонных ограждающих конструкциях защитных сооружений металлических изделий в виде защитно-герметичных входов и вводов инженерных коммуникаций, а также «бетон-бетон» в материалах заполнения полостей вертикальных стыков между сборными конструкциями крупнопанельных зданий и сооружений.

7. На основе существующей теории проницаемости пористых тел выполнено теоретическое обоснование оценки проницаемости воздухопроницаемости мест инъекционной заделки трещин составами ЦКИМ и определены параметры контроля качества тампонажных работ по воздухопроницанию уплотненных мест.

8. Разработана методика оценки качества тампонажных работ инъекционного уплотнения трещин активированными двухэтапной магнитной обработкой составами ЦКИМ по установленным в процессе экспериментальных исследований значениями коэффициента воздухопроницаемости материалов уплотнения.

### **Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы**

На основе полученных результатов можно продолжить поиск эффективных ферромагнитных наполнителей, помимо предложенных, для дальнейшего улучшения строительно-технических свойств ЦКИМ, а также снижения стоимости производства работ на их основе.

Кроме того, можно выявить оптимальное соотношение между применяемыми наполнителями и химическими пластифицирующими добавками, регулирующими реологические свойства, с целью расширения области применения разработанных составов.

Тонкие исследования структуры ЦКИМ позволили бы рассуждать о составе гидросиликатов, образуемых в процессе синтеза ЦКИМ с целью дальнейшей оптимизации их составов.

Также перспективы дальнейших исследований могут определяться разработкой составов, обладающих высокой биостойкостью, морозостойкостью и другими свойствами, определяющими их непосредственное применение в качестве строительных композитов специального назначения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абразивы и шлифование. Каталог [Электрон. Ресурс] Режим допуска <http://abrasiveworld.fromru.com/catalog/cat-grains.html>.
2. Аввакумов, Е. Г. Механические методы активации в переработке природного и техногенного сырья [Текст]/ Е. Г. Аввакумов, А. А. Гусев. - Новосибирск: Академическое изд-во "Гео", 2009. - 155 с.
3. Адгезиметр механический «КонстантаА» [Текст]: паспорт УАЛТ. 020.000.00 ПС. – Санкт-Петербург, ЗАО «Константа». – 2003. – С.12.
4. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий [Текст]/Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – 2-е изд., перераб. и доп.-М.: Наука,1976. - 279 с.
5. Активированная вода затворения как особый жидкий компонент для строительных материалов [Текст]/ В. Т. Ерофеев, Е. А. Митина, А. А. Матвиевский [и др.] // Региональная архитектура и строительство. – 2008. – № 1 (4). – С. 41 – 45.
6. Александров, С. Е. Гранулированные конвертерные шлаки в производстве строительного материала [Текст]/ С. Е. Александров, В. С. Грызлов, К. Н. Фарафонов // Строительные материалы. - 1971. - №3.
7. Андреева, А. Б. Пластифицирующие и гидрофобизирующие добавки в бетонах и растворах [Текст]. - М. : Высшая школа. - 1988. - 54 с.
8. Антоненко, В. Я. Основы физики воды [Текст]/ В. Я. Антоненко, А. С. Давыдов, В. В. Ильин. – Киев: Наукова думка, 1991. – 668 с.
9. Аппараты для активации воды и создание бетонов с биоцидными свойствами на активированной воде затворения [Текст]/ А. А. Матвиевский, В. Т. Ерофеев, С. В. Федосов [и др.] // Биотехнология: состояние и перспективы развития: материалы IVМоск. междунар. конгр. – М., 2011. – Ч. 1. – 128 с.
10. Баженов Ю. М. Технология бетона: учебник для вузов [Текст]/ Ю. М. Баженов. – М.: АСВ, 2002. – 500 с.
11. Баженов, Ю. М. Бетонополимерные материалы [Текст]/ Ю. М. Баженов, Д.А. Учингус, Г.А. Улитина. – Киев, 1978. – 88 с.

12. Барвинок, М.С. Влияние температуры и добавок на раннюю стадию твердения цемента [Текст]/ М.С. Барвинок, П. Г. Комохов, Н. Ф. Бондарева//Шестой международный конгресс по химии цемента. - М: Стройиздат, 1976. – С. 10-12.

13. Барабанщикова, Т. К. Оптимизация состава бетона с использованием заполнителей на основе отходов предприятий Волгоградской области [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Т. К. Барабанщикова. - Волгоград, 2007. - 19 с.

14. Батраков, В. Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика [Текст]/ В. Г. Батраков. - М.: 2-ое изд., перераб. и доп., 1998. - 768 с.

15. Башкатов, В. С. Способ и средства для устранения дефектов в бетонных и металлических конструкциях с помощью растворов с магнитореологическими свойствами [Текст]/ В. С. Башкатов, М. М. Смирнов // Листок изобретателя № 164. - Л.: ВИКИ им. А.Ф. Можайского, 1987. - 24 с.

16. Башкатов, В. С. Способ и средства для устранения дефектов в бетонных и металлических конструкциях с помощью растворов с магнитореологическими свойствами [Текст]/ В. С. Башкатов, М. М. Смирнов // Листок изобретателя № 164. - Л.: ВИКИ им. А. Ф. Можайского, 1987. - 24 с.

17. Белов, В. В. Малоэнергоёмкие теплоизоляционные и стеновые материалы на основе местного сырья [Текст]/ В. В. Белов, С. Н. Гамаюнов, Е. И. Ильмер // Современные проблемы строительного материаловедения: материалы междунар. конф. (четвертых академических чтений РААСН). – Пенза: ПГСА.- 1998. – Ч.II.

18. Белов, В. В. Управление структурой и свойствами композиций для изготовления строительных материалов с учетом действия капиллярного сцепления в дисперсных системах: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук: 05.23.05 [Текст] / В. В. Белов. - Пенза, 2003. - 36 с.

19. Бережной, А. И. О промышленном применении магнитной обработки при цементировании газовых скважин [Текст] / А. И. Бережной // Научно-технический сборник Мингазпрома. – М., 1968. – № 4. – С. 72 – 74.



20. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники: учебник для энергетических и электротехнических вузов [Текст] / Л. А. Бессонов. - 6-е изд. перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1973. – 752 с.

21. Бетоны с наполнителями [Текст] / В. И. Соломатов, А. В. Сиренко, В. Н. Выровой, В. И. Литвяк // Композиционные строительные материалы. – Саранск, 1987. – С. 20 – 22.

22. Биологическое сопротивление цементных композитов на активированной воде [Текст] / В. Т. Ерофеев, Е. А. Митина, А. А. Матвиевский [и др.] // Новые энерго- и ресурсосберегающие наукоемкие технологии в производстве строительных материалов : материалы всерос. науч.-техн. конф. – Пенза, 2007. – С. 74 – 76.

23. Богатырев, А. Е. Активирование веществ и его технологические применения [Текст] / А. Е. Богатырев, Л. И. Шушунова, Г. М. Цыганов. -. Обзоры по электронной технике. Серия 6. Материалы М. : ЦНИИ "Электроника", 1984. - 48 с.

24. Болотских, Н. С. Борьба с подземными водами [Текст] / Н. С. Болотских, Д. О. Слободкин. - Киев: Техника, 1982. - 154 с.

25. Бондаренко, И. Ф. Изменение свойств природных вод в магнитных полях [Текст] / И. Ф. Бондаренко, Е. З. Гак // Доклады ВАСХНИЛ. – 1979. – № 5. – С. 36 – 38.

26. Бочарников, А. С. Стойкие к динамическим нагрузкам и газопроницаению волокнистые и дисперсно-упрочненные композиционные материалы для конструкций сооружений специального строительства [Текст]: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.05 / А. С. Бочарников. - Воронеж, 2006. - 44 с.

27. Бочарников, А. С. Уплотнение дефектных мест контакта металл-бетон в конструкциях магнитными тампонажными композициями [Текст] / А. С. Бочарников, А. Д. Корнеев // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. -2005. Приложение № 3. - С. 89 – 94.

28. Бочарников, А. С. Дисперсно-армированные композиционные материалы на основе цементных вяжущих для конструкций защитных сооружений: Монография [Текст] / А. С. Бочарников // В надзаг. РААСН, Центральное отделение. - Липецк: ЛГТУ, 2004.- С.45-49.

29. Бочарников, А. С. Магнитные герметизирующие эпоксидные композиционные материалы с наполнителями из отходов производств: монография [Текст] / А. С. Бочарников, М. А. Гончарова, А. В. Глазунов; под общ. ред. А. С. Бочарникова. - Липецк: Издательство ЛГТУ, 2009.- 169 с.

30. Бочарников, А. С. Магнитные герметизирующие композиции [Текст] / А. С. Бочарников, А. Д. Корнеев, М. А. Гончарова // Строительные материалы. – 2007. - № 2. – С. 2-3.

31. Бочарников, А. С. Некоторые перспективы использования эффективных композиционных материалов в специальном строительстве [Текст] / А. С. Бочарников // Вестник Центрального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. Выпуск 11. Тамбов-Воронеж, Издательство Тамбовского государственного технического университета, 2012. – С. 194 -200.

32. Бочарников, А. С. Магниты для заделки трещин в бетоне на контакте с изделиями из металла магнитными герметизирующими материалами [Текст] / А. С. Бочарников, А. В. Глазунов // Материалы международного конгресса. Наука и инновации в строительстве. Том 3. Оценка риска и безопасность в строительстве. – Воронеж, ВГАСУ, 2008. – С. 77-79.

33. Бочарников, А. С. Композиционные материалы на основе водных активированных для инъекционного уплотнения бетона ограждающих конструкций [Текст] / А. С. Бочарников, М. А. Гончарова, А. В. Комаричев //Строительные материалы. – 2015. - № 5. – С. 31-34.

34. Бочарников, А. С. Способ герметизации неплотностей мест контакта металл-бетон магнитными составами [Текст] / А. С. Бочарников // Материалы X науч.-техн. конф. - Л.: ЛВВИСУ. -1987. - 84 с.

35. Бочарников, А. С. Герметизация зон контакта металл-бетон [Текст] / А. С. Бочарников, А. П. Смирнов // Военно-строительный бюллетень. -1987.- № 3.- С.26- 27.

36. Бочарников, А. С. Герметизация неплотностей в стыках металл-бетон [Текст] / А. С. Бочарников // Вестник ЛГТУ-ЛЭГИ. - 1999.- №2.- С.42-45.

37. Бочарников, А. С. Наполнители для магнитных герметизирующих композиций из отходов производств [Текст] / А. С. Бочарников, М. А. Гончарова, А. В. Глазунов // Вестник Центрального регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. – Воронеж-Липецк: РААСН, ЛГТУ, 2008.- С.116-121.

38. Бочарников, А. С. Магниты для заделки трещин в бетоне на контакте с изделиями из металла магнитными герметизирующими композитами [Текст] / А. С. Бочарников, А. В. Глазунов // Материалы международного конгресса «Наука и инновации в строительстве» SIB-2008, том 3 «Оценка риска и безопасность в строительстве». – Воронеж, Воронежский государственный архитектурно-строительный университет, 2008. - С. 77-79.

39. Боярченков, М. А. Магнитные элементы автоматики и вычислительной техники: уч. пособие для специальности «Автоматика и телемеханика» [Текст] / М. А. Боярченков, А. Г. Черкашина. – М.: Высшая школа, 1976.- 383 с.

40. Бутт, Ю. М., Сычев, М. М. , Тимашев, В. В. Химическая технология вяжущих материалов [Текст] / Ю. М. Бутт, М. М. Сычев, В. В. Тимашев. - М.: Высшая школа, 1980. - 471 с.

41. Вернигорова, В. Н. Физико-химические основы образования модифицированных гидросиликатов кальция в композиционных материалах на основе системы [Текст] / В.Н.Вернигорова. – Пенза: ПГУАС, 2001. – 394 с.

42. Влияние концентрации щелочи на процессы твердения шлаковых композиций [Текст] / В. И .Калашников, В. Ю. Нестеров, О. Л. Викторова, С. А. Панин, Н. П. Шалыгин // Тез. докл. XXIX всероссийской научн.-техн. конф. профес.-преп. состава, науч. работников, асп., студ. / ПГАСА. Пенза, 1997. - С. 52-53.

43. Влияние способов активации на химические и физико-химические свойства воды [Текст] / А. А. Седова, А. К. Осипов, А. А. Матвиевский [и др.] // Вестник Волжского регионального отделения / РААСН. – 2010. – Вып. 13. – С. 236 – 240.

44. Влияние суперпластификатора на твердение цемента [Текст] / В. И. Калашников, Ю. М. Баженов, В. С. Демьянова, М. О Коровкин // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2000. - № 1. – С. 28-29.

45. Волженский, А. В. Минеральные вяжущие вещества [Текст] / А. В. Волженский. -4-е изд., перераб. и доп. - М.: Стройиздат, 1986. - 464 с.
46. ВСН 166-91/МО. Инструкция по технологии герметизации ограждающих конструкций специальных сооружений [Текст].- М., 1992. - 69 с.
47. Выбор добавок – компенсаторов усадки в сухих строительных смесях для устройства наливных полов [Текст] / А. В. Комаричев, М. А. Гончарова, А. Н. Ивашкин, О. А. Ивашкина // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. 2015. № 2. С. 65-69.
48. Гаврилов, И. В. Свойства противоморозных добавок, модифицированных С-3 и лигносульфонатами техническими [Текст] / И. В. Гаврилов, В. И. Гаврилов, Г. Н. Гвоздовский //Строительные материалы. – 2005. - №6. – С. 41-43.
49. Гаркави, М. С. Возможные схемы структурообразования в вяжущих системах [Текст] / М. С. Гаркави // Современные проблемы строительного материаловедения: труды. междунаро. конф. - Самара: СамГАСА, 1995. - С.75-77.
50. Герметизация сооружений [Текст]: справочное пособие. Под общ. ред. А. П. Смирнова. – М.: Военное издательство Министерства обороны СССР, 1979. – 168 с.
51. Глазунов, А. В. Магнитные герметизирующие эпоксидные композиционные материалы с наполнителями из отходов производств: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 [Текст] / А. В. Глазунов. – Волгоград, 2010. – 23 с.
52. Глебов, А. Р. Магнитохимия: Магнитные свойства и строение веществ [Текст] / А. Р. Глебов, А. Р. Буданов. - Соросовский образовательный журнал, №7, 1997.
53. Глеккель, Ф. А. Физико-химические основы применения добавок к минеральным вяжущим [Текст] / Ф. А. Глеккель. – Ташкент: Фан, 1975. – 158 с.
54. Гольдштейн, Л. Я. Комплексные способы производства цемента [Текст] / Л. Я. Гольдштейн. - Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1985. - 160 е., ил.
55. Гончарова, М. А. Выбор наполнителя в составах мастичных композиций из отходов металлургии [Текст] / М. А. Гончарова, А. Д. Корнеев, А. С. Бочарников,

П. В. Требухин.: Сб. статей междунаrodn. научно-практ. конф. – Липецк: ЛГТУ, 2007. – С. 119-121.

56. Гончарова, М. А. Исследование составов композиционных строительных материалов на основе побочных продуктов металлургического комплекса [Текст] / М. А. Гончарова, А. Д. Корнеев // Вестник Центрального регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. – Воронеж-Липецк: РААСН, ЛГТУ, 2008.- С.122-130.

57. Гончарова, М. Ю. Влияние различных активаторов на твердение и фазовый состав новообразований шлакового вяжущего [Текст] / М.Ю. Гончарова // Современные проблемы строительного материаловедения: Тез. докл. междунаrodn. научно-технической конф. - Пенза, 1998 . - С. 24 - 26.

58. ГОСТ 28818 – 90. Материалы шлифовальные из электрокорунда. Технические условия [Текст]. – Москва: Изд-во стандартов. – 1989. – 17 с.

59. Горленко, Н. П. Низкоэнергетическая активация дисперсных систем [Текст] / Н. П. Горленко, Ю. С.. Саркисов. - Томск: Издательство ТГАСУ, 2011. - 264 с.

60. Горшков, В. С. Комплексная переработка и использование металлургических шлаков в строительстве [Текст] / В. С. Горшков, С. Е. Александров, С. И. Иващенко, М. В. Горшкова. – М.: Стройиздат, 1985. – 272 с.

61. Греховский, С. Г. Основные направления развития новой техники в строительстве и расчет ее эффективности [Текст] / С. Г. Греховский.- Киев: Вища школа, 1982.- 32 с.

62. Данилов, Б. П. Применение шлаковых вяжущих в производстве сборного железобетона [Текст] /Б.П. Данилов, Р.М. Бородинская, В.В. Попов. - Киев: Будівельник, 1964. – 88 с.

63. Десов, А. Е. Некоторые вопросы теории усадки бетона [Текст] / Д. Е. Десов, К. Г. Красильников, З. Н. Цилосани // Ползучесть и усадка бетона и железобетонных конструкций. – М., 1976. – С. 41-49.

64. Дисперсно-кристаллитная структура и параметры разрушения цементного камня [Текст] / Н. И. Макридин, В. Н. Вернигорова, И. Н. Максимов, Н. В.

Фомина // Материалы XXIX научно-технической конференции / Пенз. ГАСА. – Пенза, 1997. – С. 87-89.

65. Долгорев, А. В. Вторичные ресурсы в производстве строительных материалов [Текст] / А. В. Долгорев. – М.: Стройиздат, 1990. – 456 с.

66. Дубинин, И. С. Влияние суперпластификаторов на свойства цементных паст [Текст] / И. С. Дубинин, В. А. Кудинов, А. А. Смирнов // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева: Сб. тр. – 1988. – Т. 211. – С. 79-84.

67. Ерофеев, В. Т. Долговечность цементных композитов на активированной воде [Текст] / В. Т. Ерофеев, Е. А. Митина, А. А. Матвиевский // Промышленное и гражданское строительство. – 2008.- № 7. – С.51-52.

68. Журавлев, В. Ф. Химия вяжущих веществ [Текст] / В. Ф. Журавлев. - М.: Госхимиздат, 1951.

69. Затравки структурообразования цементного камня и его механическая прочность [Текст] / Н. И. Макридин, И. Н. Максимова, Ю. В. Овсюкова, П. А. Апин // Сырьевые ресурсы регионов и производство на их основе строительных материалов: материалы Всеросс. научно-техн. конф. – Пенза: ПДЗ, 2007. – С. 188-193.

70. Заявка №3139565. Приоритет изобретения 10 апреля 1986 г. А.с. № 250580 (СССР) [Текст] / А. С. Бочарников, Г. П. Афоницева // Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений СССР 2 марта 1987 г.

71. Зедгенидзе, И. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем [Текст] / И. Г. Зедгенидзе. – М.: Наука, 1976. – 92 с.

72. Зенин, С. В. Возникновение ориентационных полей в водных растворах [Текст] / С. В. Зенин // Журнал физической химии. – 1994. – Т. 68. – С. 500 – 503.

73. Зенин, С. В. Гидрофобная модель структуры ассоциатов молекул воды [Текст] / С. В. Зенин // Журнал физической химии. – 1994. – Т. 68. – С. 634 – 641.

74. Зинченко, С. М. Модифицирующие органоминеральные комплексы для цементных композиций: автореф. дис. ... канд. техн. наук 05.23.05 [Текст] / С. М. Зинченко. - Волгоград, 2012. - 20 с.

75. Золототрубов, Д. Ю. Закономерности формирования плотно упакованной структуры дисперсно-зернистых строительных материалов при электрофизическом воздействии: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.23.05 [Текст] / Д. Ю. Золототрубов. - Воронеж, 2006. - 21 с.

76. Зубова, М. О. Мелкозернистые бетоны с применением базальтовой фибры и комплексных модифицированных добавок: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 [Текст] / М.О. Зубова. - Волгоград, 2014. – 23 с.

77. Иванова, Г. М. Изменение структуры воды и водных растворов под действием магнитного поля [Текст] / Г. М. Иванова, Ю. М. Махнев // Тезисы докладов второго Всесоюз. семинара «Вопросы теории и практики магнитной обработки воды». – М., 1969.

78. Иванов, И. К. Применение химических добавок в бетон - ключ к решению технологических проблем [Текст] / И. К. Иванов // Строительные материалы.- 2006.- № 10.- С. 36-37.

79. Изотов, В. С. Особенности формирования прочности бетона с повышенными дозировками золы и гипса [Текст] / В. С. Изотов // Строительные материалы, № 2, 1998. – С. 16-18.

80. Изотов, В. С. Формирование структуры и свойств бетонов на активированных смешанных вяжущих: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.23.05 [Текст] / В. С. Изотов. - Казань, 2005. – 40 с.

81. Инъектор для нагнетания раствора в скважины строительных конструкций: а. с. № 850805 (СССР) [Текст] / М. Д. Бойко, В. А. Заваров. - 1981.

82. Инъектор для нагнетания растворов с магнитными свойствами в скважины строительных конструкций :а. с. № 1138457 (СССР) [Текст]. – 1984.

83. Иочинская, И. А. Влияние комплексных добавок на процессы гидратации и твердения портландцемента: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 [Текст] / И. А. Иочинская. - М., 1974. - 20 с.

84. Матвиевский, А.А. Исследование свойств наполненных цементных композитов, растворов и бетонов на активированной воде затворения [Текст] / А. А.

Матвиевский, Д. В. Емельянов, П. В. Юдин [и др.] // Актуальные вопросы строительства : материалы Междунар. науч.-техн. конф. : в 2 ч. – Саранск, 2009. – Ч. 1. – С. 144 – 148.

85. Исследование свойств наполненных цементных композитов, растворов и бетонов на активированной воде затворения [Электронный курс] / А. А. Матвиевский, Е. А. Митина, В. Т. Ерофеев [и др.] // Строительство, архитектура, дизайн. – Электрон. журн. – Саранск, 2009. – №3 (7). – Режим доступа :<http://marchdi.mrsu.ru>.

86. Исследование свойств цементных композитов, растворов и бетонов на активированной воде затворения [Текст] / В. Т. Ерофеев, Е. А. Митина, Д. В. Емельянов [и др.] // актуальные вопросы строительства : материалы Всерос. науч.-техн. конф. – Саранск, 2006. – С. 423 – 428.

87. Исследование стойкости цементных композитов на активированной воде затворения в биологически агрессивной среде [Текст] / В. Т. Ерофеев, Е. А. Митина, А. А. Матвиевский [и др.] // Актуальные вопросы строительства : материалы Междунар. науч.-техн. конф. 6 в 2 ч. – Саранск, 2007. – Ч. 2. – С. 351 – 352.

88. Исследование структурообразования цементных композитов на активированной воде затворения [Текст] / В. Т. Ерофеев, Е. А. Митина, В. В. Батин [и др.] // Актуальные вопросы строительства : материалы Всерос. науч.-техн. конф. – Саранск, 2006. – С. 418 – 422.

89. Исследование структурообразования цементных композитов на активированной воде затворения [Электронный курс] / В. Т. Ерофеев, Е. А. Митина, А. А. Матвиевский [и др.] // Строительство, архитектура, дизайн. – Электрон. журн. – Саранск, 2009. – №1 (5). – Режим доступа :<http://marchdi.mrsu.ru>.

90. Казанская, Е. Н. Особенности активных центров на поверхности шлаковых стекол [Текст] / Е.Н. Казанская, М.М. Сычев, М.М. Газизов // Цемент. 1989. - №5. - С.8-9.

91.18. Калачев, В. В. Техногенные отходы металлургии – сырьевая база для минерально-шлаковых композиционных вяжущих [Текст] / В. В. Калачев, О. Ю. Пушкарская, Л. Н. Губанова // Материалы V Международной научно-технической конференции. – Волгоград, 2009. – Ч.1. – С. 114-120.



92. Калашников, В. И. Основы пластифицирования минеральных дисперсных систем для производства строительных материалов: дис. ... д-ра техн. наук в форме науч. докл. [Текст] / Калашников Владимир Иванович. – Воронеж, 1996. – 89 с.

93. Калашников, В. И. Перспективы использования реакционно-порошковых сухих бетонных смесей в строительстве [Текст] / В. И. Калашников // Строительные материалы. – 2009. - №7. – С. 59-61.

94. Калашников, В. И. Через рациональную реологию в будущее бетонов [Текст] / В. И. Калашников // Технология бетонов. – 2007. - №5. – С. 8-10; - № 6. – С. 8 – 11; 2008. - №1. – С. 22-26.

95. Каммерер, Ю. Ю. Защитные сооружения гражданской обороны: Устройство и эксплуатация: учебное пособие [Текст] / Ю. Ю. Каммерер, А. К. Кутырев, А. Е. Харкевич. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 232 с.

96. Каприелов, С. С. Модифицированные бетоны нового поколения: реальность и перспектива [Текст] / С. С. Каприелов, В. Г. Батраков, А. В. Шейнфельд // Бетон и железобетон. – 1999. - №6. – С. 6 – 10.

97. Касаткина, В. И. Влияние механомагнитной активации водных систем на свойства бетона [Текст] / В. И. Касаткина, С. В. Федосов, М. В. Акулова // Строительные материалы. – 2007. - № 11. – С.58-59.

98. К вопросу оптимизации структуры и свойств бетона [Текст] / Н. И. Макридин, А. П. Прошин, И. Н. Максимова [и др.] // Современные проблемы строительного материаловедения. Часть III. Перспективные направления в теории и практике минеральных вяжущих веществ и материалов на их основе. - Казань, 1996.- С. 70-72.

99. Кинд, В. А. Специальные цементы [Текст] / В. А. Кинд. – 2-е изд., доп. - М.: ОНТИ: Гл. ред. строит. лит., 1936. - 108 с., ил.

100. Клавдиева, Т. Н. Разработка составов и повышение эксплуатационных характеристик цементных бетонов при использовании техногенного сырья металлургии: автореф. дис. ... канд. техн. наук 05.23.05 [Текст] / Т. Н. Клавдиева. - Волгоград, 2010. - 23 с.

101. Классен, В. И. Омагничивание водных систем [Текст] / В. И.Классен. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1982. – 296 с.

102. Классен, В. И. Изменение инфракрасного спектра поглощения разбавленного раствора  $H_2O$  в  $D_2O$  после прохождения сквозь магнитное поле [Текст] / В. И. Классен, Г. В. Жиленко, Г. С. Бергер [и др.] // Доклады Ан СССР. – 1968. – Т. 183, № 5. – С. 1123 – 1126.

103. Комаричев, А. В. Воздухопроницаемость как параметр оценки качества инъекционной заделки трещин в бетонных ограждающих конструкциях [Текст] / А. В. Комаричев, А. С. Бочарников, М. А. Гончарова, Н. А. Каширина // Жилищное строительство. – 2015. - № 11. – С. 14 – 17.

104. Комаричев, А. В. Композиционные материалы на основе цементно-водных активированных систем для инъекционного уплотнения бетона ограждающих конструкций [Текст] / А. В. Комаричев, А. С. Бочарников, М. А. Гончарова // Строительные материалы. – 2015. - № 5. – С. 31-34.

105. Комаричев, А. В. Сухие строительные смеси с использованием отходов металлургического производства [Текст] / А. В. Комаричев, М. А. Гончарова, В. В. Крохотин // Строительные материалы. – 2013. - № 5. – С. 66-67.

106. Комаричев, А. В. Магнитные цементные тампонажные композиционные материалы: монография [Текст] / А. В. Комаричев, А. С. Бочарников, М. А. Гончарова, Тамбов: Изд-во Першина Р.В., 2015. – 152 с.

107. Комаричев, А. В. Конвертерные шлаки – перспективные вторичные сырьевые ресурсы для производства строительных композитов [Текст] / А. В. Комаричев, М. А. Гончарова, С. В. Маклаков // Современная металлургия нового тысячелетия: сб. науч. тр. междунар. науч.-практ. конф. – 8-11 декабря 2015 г. – Часть 2. – Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2015. – С. 121 – 127.

108. Комаричев, А. В. Особенности зернистых конвертерных шлаков и их совмещение с вяжущими системами строительных композитов [Текст] / А. В. Комаричев, М. А. Гончарова // Инновационные технологии в науке и образовании : материалы III Междунар. науч.-практ. конф. (Чебоксары, 23 окт. 2015 г.) / редкол.:

О. Н. Широков [и др.]. – Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2015. – № 3 (3). – С. 187 – 190.

109. Кондрашенков, А. А. Исследование свойств вяжущих щелочного возбуждения на основе металлургических шлаков Южного Урала [Текст] /А.А. Кондрашенков. - Воронеж, 1977. - С. 50.

110. Кондрашов, А. А. Вяжущие свойства конвертерных шлаков [Текст] /А.А. Кондрашов// Рациональное использование шлаков и продуктов шлакопереработки в строительстве. - Воронеж,1977. - С. 114.

111. Концепция, методология и инженерные решения комплексной и глубокой переработки техногенных продуктов в строительные материалы [Текст] / Е. М. Чернышов, О. Р. Сергуткина, Н. Д. Потамошнев, И. И. Анохина, В. В. Власов // Высокие технологии в экологии: Труды 2-ой Междунар.науч.-техн. конф.- Воронеж, 1999.- С. 352-359.

112. Корнеев, А.Д. Строительные композиционные материалы на основе шлаковых отходов: монография [Текст] /А.Д. Корнеев, М.А. Гончарова, Б.А. Бондарев. – Липецк: ЛГТУ, 2002. – 120 с.

113. Корнеев, А. Д. Структурные факторы и их классификация [Текст] / А. Д. Корнеев // Тезисы докладов семинара «Решение проблемы охраны окружающей среды путем использования отходов промышленности в композиционных материалах». – Пенза, 1983. – С.16.

114. Красовский, Г. И. Планирование эксперимента [Текст] / Г. И. Красовский, Г. Ф. Филаретов. – Минск: Издательство БГУ. - 1982. - 302 с.

115. Кудяков, А. И. Улучшение качества цементного камня путем многочастотной ультразвуковой активации воды затворения [Текст] / А. И. Кудяков, А. Г. Петров, Г. Г. Петров, К. В. Иконникова // Вестник ТГАСУ.- 2012.- № 3.- С. 143-152.

116. Королев, В. И. Магнитная обработка воды в технологии бетона [Текст] / К. М. Королев, В. М. Медведев//Бетон и железобетон. - 1971.-№ 8.-С.44-45.

117. Кузнецова, С. Ю. Магнитные свойства воды [Электронный ресурс] / С. Ю. Кузнецова // Успехи современного естествознания.- 2010.- № 10.- С. 49-51.

URL: [www.rae.ru/use/?section=content&op=show\\_article&article\\_id=7785577](http://www.rae.ru/use/?section=content&op=show_article&article_id=7785577) (дата обращения: 03.10.2011).

118. Ласкорин, Б. Н. Безотходная технология в промышленности [Текст] / Б. Н. Ласкорин. - М. :Стройиздат, 1986. - 160 с., ил.

119. Лотов, В. А. Закономерности оптимального формирования структур в технологии материалов на основе силикатных дисперсных систем [Текст] / В. А. Лотов. -. Дисс. на соиск д-ра техн. наук. - Томск, 2002. - 360 с.

120. Лотов, В. А. Технология материалов на основе силикатных дисперсных систем [Текст] / В. А. Лотов. - Томск: Изд-во ТПУ, 2006. - 202 с.

121. Лотов, В. А. Нанодисперсные системы в технологии строительных материалов и изделий [Текст] / В. А. Лотов // Изв. Томского политех. ун-та.- 2007.- Т. 311, № 3.- С. 84-88.

122. Макридин, Н. И. О структурообразовании цементного камня [Текст] / Н. И. Макридин, А. П. Прошин, В. Н. Вернигорова // Современные проблемы строительного материаловедения: труды межд. конф.- Самара: СамГАСА, 1995. С.7-10.

123. Матвиевский, А. А. Композиционные строительные материалы на основе активированной воды затворения: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 [Текст] / А. А. Матвиевский. - Пенза, 2008. - 18 с.

124. Матвиевский, А. А. Новые строительные материалы на основе активированной воды затворения с улучшенными физико-техническими и эксплуатационными свойствами [Текст] / А. А.Матвиевский, Д. В. Емельянов, П. В. Юдин // Композиционные строительные материалы. теория и практика. – Пенза, 2010. – С. 53 – 58.

125. Матвиевский, А. А. Цементные композиты на основе магнитно- и электрохимически активированной воды затворения :автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.05 [Текст] / А.А. Матвиевский. – Саранск, 2010. – 24 с.

126. Материалы шлифовальные из карбида кремния. Технические условия. ГОСТ 26327-84 [Текст]. – Москва: Изд-во стандартов, 1983. – 12 с.

127. Материалы шлифовальные из карбида кремния черного марки 51С. Технические условия. ТУ 2 – 036 – 972 – 85 [Текст]. - Москва: Изд-во стандартов, 1984. – 12 с.

128. Материалы шлифовальные из электрокорунда белого. Технические условия. ТУ 2 – 036 – 350 – 74 [Текст] . - Москва: Изд-во стандартов, 1973. – 11 с.

129. Материалы шлифовальные из электрокорунда белого. Технические условия. ТУ 2 – 036 – 288 – 86 [Текст]. - Москва: Изд-во стандартов, 1985. – 13 с.

130. Материалы шлифовальные из электрокорунда белого. Технические условия. ТУ 2 – 036 – 314 – 88 [Текст]. - Москва: Изд-во стандартов, 1987. – 15 с.

131. Материалы шлифовальные из хром - титанистого электрокорунда. Технические условия. ТУ 2 – 036 – 0221066 – 007 – 90 [Текст]. - Москва: Изд-во стандартов, 1989. – 12 с.

132. Материалы шлифовальные из хром - титанистого электрокорунда. ТУ 2 – 036 – 849 – 85 [Текст]. - Москва: Изд-во стандартов, 1984. – 13 с.

133. Материалы шлифовальные из циркониевого электрокорунда. Технические условия. ТУ 2 – 036 – 0221841 – 006 – 90 [Текст]. - Москва: Изд-во стандартов, 1989. – 16 с.

134. Материалы шлифовальные из сфорокорунда. Технические условия. ТУ 2 – 036 – 0221841 – 006 – 90 [Текст]. - Москва: Изд-во стандартов, 1989. – 12 с.

135. Материалы шлифовальные. Классификация. Зернистость и зерновой состав. Методы контроля. ГОСТ 3647 – 80 [Текст]. - Москва: Изд-во стандартов, 1979. – 21 с.

136. Мартынова, О. И. К вопросу о механизме влияния магнитного поля на водные растворы солей [Текст] / О. И. Мартынова, Б. Т. Гусев, Е. А. Леонтьев // Успехи физических наук. – 1969. – Т. 98, вып. 1. – С. 195 – 199

137. Методы оценки магнитной восприимчивости цементных инъекционных смесей [Текст] / А. В. Комаричев, М. А. Гончарова, А. С. Бочарников, И. О. Саяхова // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. 2015. № 6. - С. 93-99.

138. Миненко, В.И. Магнитная обработка воды [Текст] / В. И. Миненко, С. М. Петров, М. Н. Минц. – Харьков : Харьковское книжное. изд-во, 1962. – 96 с.

139. Налимов, В. В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов [Текст] / В. В. Налимов, Н. А. Чернова. - М.: Наука, 1965. - 340 с.

140. Носов, С. В. Планирование эксперимента: учеб. пособие [Текст] / С. В. Носов. – Липецк: ЛГТУ, 2003. – 85 с.

141. Объедков, В. А. Лабораторный практикум по строительной физике: учеб. пособие для студентов вузов [Текст] / В. А. Объедков, А. К. Соловьев, А. Л. Кондратенков. – М.: Высшая школа, 1979. – С.64-69.

142. Огороднев, Б. Е. Заделка трещин в железобетонных конструкциях методом инъекции водоцементных смесей и полимерных смол: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 [Текст] / Б. Е. Огороднев. - Свердловск, 1966. - 18 с.

143. Оптимизация строительно-технических свойств асфальтобетонов с применением отходов металлургического производства [Текст] / Комаричев А. В., А. Д. Корнеев, С. А. Андриянцева, М. А. Гончарова // Фундаментальные исследования. – 2015. - №2-8 – С. 1620-1625.

144. Параметры трещиностойкости цементных систем с позиций механики разрушения [Текст] / Н. И. Макридин, А. П. Прошин, В. И. Соломатов, И. Н. Максимова. – М.: ВНИИНТПИ, 1998. – 134 с.

145. Паспорт на повершностемер ПМЦ-500. – Инженерная фирма «Интеграл» «НИИ-цемент» [Текст]. – 1990. – 30 с.

146. Патент на изобретение № 2550712 Российская Федерация, МПК Е 04 G 23/02//Т 02 D 3/12. Устройство для герметизации мест примыкания металл-бетон в ограждающих конструкциях защитных сооружений [Текст] / М. А. Гончарова, А. С. Бочарников; Заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО ЛГТУ. – 2014113727/03; заявл. 08.04.2014; опубл.10.05.2015. - Бюл. №13.

147. Повх, И. Л. Магнитная и электротилическая обработка воды при производстве бетона [Текст] / И. Л. Повх, В. Б. Совпель, Н. А. Бычин // Вопросы теории и практики магнитной обработки воды и водных систем. – М., 1971. – С. 227 – 228.

148. Программа для ЭВМ «Расчетно-экспериментальный способ подбора состава архитектурного бетона с оптимальными параметрами» [Текст] / Комаричев А. В., Гончарова М. А., Ивашкин А. Н., Суханов А. В. // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016611524. Заявка № 2015662325. Дата поступления 16 декабря 2015 г. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 04 февраля 2016 г.

149. Прочность и параметры разрушения цементных композитов: монография [Текст] / И. Н. Максимова, Н. И. Макридин, В. Т. Ерофеев, Ю. П. Скачков. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2015. – 360 с.

150. Ребиндер, П. А. Поверхностные явления в дисперсных системах [Текст] / П. А. Ребиндер. - М.: Коллоидная химия 1978. - 368 с.

151. Рубанов, Ю. К. Активация и технологические свойства шлаков, склонных к силикатному распаду [Текст] / Ю. К. Рубанов, И. В. Старостина, Е. И. Евтушенко // Современные проблемы строительного материаловедения: V академические чтения РААСН. - Воронеж, 1999. - С. 380-384.

152. Руководство по проектированию строительных конструкций убежищ гражданской обороны [Текст] / ЦНИИПромзданий Госстроя СССР. – М.: Стройиздат, 1982. – 296 с.

153. Руководство по определению экономической эффективности использования новой техники, изобретений и рационализаторских предложений в производстве строительных конструкций и деталей из сборного железобетона [Текст]. - М.: Стройиздат, 1981.- 208 с.

154. Руководство по определению экономической эффективности повышения качества и долговечности строительных конструкций [Текст]. – М.: Стройиздат, 1981. – 56 с.

155. Руководство по определению экономической эффективности использования новой техники, изобретений и рационализаторских предложений в производстве строительных конструкций и деталей из сборного железобетона [Текст]. – М.: Стройиздат, 1981. – 208 с.

156. Рыбьев, И. А. Разработка новых материалов и технологий с общих позиций теории ИСК [Текст] / И. А. Рыбьев // Межвузовский сборник научных трудов, часть 2.: Белгород.- 1995. - С. 3-11.

157. Свидетельство на полезную модель № 19382 Российская Федерация, МПК С 02 F 1/48. Устройство для обработки воды магнитных полей [Текст] / А. С. Ювшин, В. Г. Овчинников, В. Ф. Подгорный, А. А. Матвиевский; заявитель и патентообладатель «Максмир-М». - № 2001109900/20 ;заявл. 16.04.2001 ;опубл. 27. 08. 2001. – Бюл. № 24.

158. Свидетельство на полезную модель № 43542 Российская Федерация, МПК С 02 F 1/46. Устройство для электроактивации водных систем [Текст] / А. С. Ювшин, В. Г. Овчинников, В. А. Помазкин, А. А. Матвиевский; заявитель и патентообладатель «Максмир-М». - № 2004129085/22; заявл. 05.10.2004; опубл. 27. 01. 2005. – Бюл. № 3.

159. Современные способы устройства высококачественных декоративных бетонных полов [Текст] / А. В. Комаричев, А. Н. Ивашкин, О. А. Каширская, М. А. Гончарова // Научно-технические инновации: сб. докладов Юбилейной Международ. науч. – практ. конф., посвященной 60-летию БГТУ им. В. Г. Шухова. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2014. – С. 117 – 121

160. Слизнаева, Т. Е. Мелкозернистые бетоны на основе механомагнитоактивированных водных систем с органическими и неорганическими добавками-модификаторами: дисс.... на соискание ученой степени доктора технических наук [Текст] / Т. Е. Слизнаева. - Иваново. 2015. - 347с.

161. СНиП II-11-77. Защитные сооружения гражданской обороны: Нормы проектирования [Текст]. – М.: Стройиздат, 1978.

162. Соломатов, В.И. Развитие полиструктурной теории композиционных строительных материалов [Текст] / В.И. Соломатов. – Известия ВУЗов. Строительство и архитектура, 1985. - №8. - С. 58-64.

163. Соломатов, В. И. Полиструктурная теория композиционных строительных материалов: монография [Текст] / В. И. Соломатов, В. Н. Выровой, А. Н. Бобрышев // Ташкент: ФАН, 1991.- 345 с., ил.



164. Соломатов, В. И. Полимерные композиционные материалы в строительстве: монография [Текст] / В. И. Соломатов, А. Н. Бобрышев, К. Г. Химмлер; под ред. В. И. Соломатова. – Стройиздат, 1988. – 312 с.

165. Соломатов, В. И. Бетон как композиционный материал [Текст] / В. Н. Выровой, Н. А. Аббасханов. – Ташкент: УзНИИТИ. – 1985. – 31 с.

166. Соломатов, В. И. Кластеры в структуре и технологии композиционных строительных материалов [Текст] / В. И. Соломатов, А. Н. Бобрышев, А. П. Прошин // Изв. вузов: Строительство и архитектура, 1983. – № 4. – С. 56-61. 7

167. Способ заделки трещин в бетонных ограждающих конструкциях: а.с. № 857377 (СССР) [Текст] / М. Д. Бойко, В. А. Заваров. — 1981.

168. Способ заделки трещин в металлической гидроизоляции: а.с. № 870729 (СССР) [Текст] / М. Д. Бойко, В. А. Заваров, Е. А. Вольский. — 1981.

169. Способ цементации бетонных конструкций: а.с. № 1006657 (СССР) [Текст] / М. Д. Бойко, В. А. Заваров. - 1981.

170. Способ заделки трещин в бетонных конструкциях: а.с. № 1074979 (СССР) [Текст] / В. А. Заваров, М. М. Смирнов. - 1983.

171. Способ заделки трещин в металлической гидроизоляции: а.с. № 1257192 (СССР) [Текст] / В. А. Заваров. - 1985.

172. Способ заделки волосяных трещин на вертикальных и обратных поверхностях металлоконструкций: а.с. № 1297558 (СССР) [Текст] / В. А. Заваров. - 1986.

173. Способ цементации бетонных конструкций: а.с. № 1006657 (СССР) [Текст] / М. Д. Бойко, В. А. Заваров. - 1981.

174. Статистические методы в инженерных исследованиях (лабораторный практикум): учеб. пособие [Текст] / В. П. Бородюк, А. П. Воцинин, А. З. Иванов; под ред. Г. К. Круга. - М.: Высшая школа, 1983. – 216 с.

175. Структура и конструкционная прочность цементных бетонов [Текст] / Н. И. Макридин, И. Н. Максимова [и др.]. - М.: ВНИИТПИ, 1999. Часть I. - 156 с.

176. Стукалов, П. С. Магнитная обработка воды [Текст] / П. С. Стукалов, Е. В. Васильев, И. А. Глебов. – Л.: Судостроение, 1969. – 190 с.

177. Сычев, М. М. Активация твердения цементного теста путем поляризации [Текст] / М. М. Сычев//Цемент. – 1987. - № 8. – С. 78.

178. Тараканов, О. В. Структурообразование и твердение цементных бетонов с комплексными ускоряющими и противоморозными добавками на основе вторичного сырья: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук: 05.23.05 [Текст] / О. В. Тараканов. - Пенза, 2004. - 46 с.

179. Тейлор, Х. Химия цемента [Текст] / Х. Тейлор. - М.: Мир, 1996. - 560 с.

180. Теоретические основы электротехники. Ч. II, III. Нелинейные цепи и электромагнитное поле [Текст] / Г. И. Атабеков, С. Д. Куплян, А. Б. Тимофеев, С. С. Хухриков.- М.-Л., изд. «Энергия», 1966. – 280 с.

181. Торопов, Н. А. Химия цементов [Текст] / Н. А. Торопов. - М.: Промстройиздат, - 1956. - 387 с

182. Улазовский, В. А. Влияние омагниченной воды затворения на процессы кристаллизационного твердения цементного камня [Текст] / В. А. Улазовский, С. А. Ананьина. - Волгоград: Волгоградский ин-т инженеров городского хозяйства, 1970. - 114 с.

183. Управление процессами технологии, структурой и свойствами бетонов: коллективная монография кафедры [Текст] / под ред. Е.М. Чернышова, Е.И. Шмитько. Воронежский гос. арх.-строит. ун-т. – Воронеж, 2002. – 344 с.

184. Устройство для магнитной обработки водных систем, и установка для обработки водных систем: пат. на изобретение 2223235 Российская Федерация, МПК С 02 F 1/48//С 02 F 103/02. [Текст] / А. С. Ювшин, А. А. Матвиевский, В. Г. Овчинников; заявитель и патентообладатель «Максмир-М». - №2002120207/15; заявл. 30.07.2002; опубл. 02.10.2004. - Бюл. №4.

185. Устройство для уплотнения бетона ограждающих конструкций подземных сооружений: а.с. № 870725 (СССР) [Текст] / М. Д. Бойко, В. А. Заваров, В. В. Павлов. -1981.

186. Устройство для герметизации мест контакта металл-бетон в конструкциях защитных сооружений [Текст] / А. В. Комаричев, А. С. Бочарников, М. А. Гончарова, О. А. Ивашкина // Вестник Липецкого государственного технического университета (Вестник ЛГТУ). - №4 (26). – 2015. – С. 52 -55.

187. Физико-химическая механика дисперсных структур [Текст] / Под ред. П. А. Ребиндера. - М.: Наука, 1966. - 400 с.

188. Фолимагина, О. В. Разработка строительных материалов на основе магнитомеханической активированной водогипсовой суспензии: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.23.05 [Текст] / О. В. Фолимагина. – Пенза, 2011.- 20 с.

189. Хигерович, М. И. Гидрофобно-пластифицирующие добавки для цементов, растворов и бетонов [Текст] / М. И. Хигерович, В. Е. Байер. – М.: Стройиздат, 1979.

190. Цементные бетоны с минеральными наполнителями [Текст] / Л. И. Дворкин, В. И. Соломатов, В. Н. Выровой, С. М. Чудновский. - Киев: Будівельник, 1991. - 137 с.

191. Цементные композиты на основе магнитно- и электрохимически активированной воды затворения: монография [Текст] / Ю. М. Баженов, С. В. Федосов, В. Т. Ерофеев и [др.] – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2011. – 128 с.

192. Чернышов, Е. М. Неоднородность строения и закономерности формирования поля напряжений при силовом нагружении строительных композитов [Текст] / Е. М. Чернышов, Е. И. Дьяченко, А. И. Макеев // Вестник отделения строительных наук РААСН: вып. 3. - М., 1995. - С.184-193.

193. Чернышов, Е. М. Неоднородность строения как фундаментальная материаловедческая характеристика строительных композитов [Текст] / Е. М. Чернышов, Е. И. Дьяченко, А. И. Макеев // Вестник отделения строительных наук РААСН: Вып. 2. - М., 1999. - С.390-402.

194. Чернышов, Е.М. Развитие современной методологии исследования проблем строительного материаловедения и технологии [Текст] / Е. М. Чернышов // Современные проблемы строительного материаловедения: V академические чтения РААСН. - Воронеж, 1999. - С. 519-526.

195. Шишкин, В. И. Оценка устойчивости структуры щебня из мартеновского шлака [Текст] / В. И. Шишкин, К. М. Воронин // Ресурсосбережение при производстве строительных материалов и изделий: Межвузовский сборник МГМИ. - Магнитогорск, 1991. - С. 9-12.

196. Шмитько, Е. И. Управление процессами раннего формирования структуры керамических материалов [Текст] / Е. И. Шмитько, А. А. Суслов, А. Е. Турченко // Строитель. – М. – 2003, вып. 3.

197. Шмитько, Е. И. О некоторых аспектах процессов структурообразования цементно-водных композиций [Текст] / Е. И. Шмитько, А. В. Крылова, Н. А. Борисова/ Труды VIII академических чтений отделения наук РААСН. – Самара: СГАСУ. – 2004.

198. Шмитько, Е. И. Управление структурой дисперсно-зернистых материалов с учетом дисперсности и внутренних сил [Текст] / Е. И. Шмитько, М. В. Титова // Строительные материалы. – М. – 2008. - №8.

199. Шмитько. Е. И. Химия цементов и вяжущих веществ [Текст] / Е. И. Шмитько, А. В. Крылова, В. В. Шаталова. - Проспект Науки, 2006.

200. Bordi. S. Variazione annual delladifferenza di potenzialetraduelettrodi immerse in acqua/ S. Bordi, G. Papeschi //Geofisika e meteorologia. - 1965. – Vol. 14, №12. – P. 25-27.

201. Blough. N. N. Molecular prove systems for reactive transients in natural waters/ N. N. Blough, E. Micinski, B. Dister [etal] // Mar.Chem. – 1990. - №30 (1-3). – P.45 – 70.

202. Costa U., Massazza F., Barriala F. Adsoption of superplasticizers on  $C_3S$  changes in zeta potential and reology of pastes/ U. Costa, F. Massazza, F. Barriala // Cemento, 1982, №4 – PP. 323-336.

203. Tsai, C.J. Theoretical Study of the  $(H_2O)_6$  Cluster/C.J. Tsai, K.D. Jordan// Chemical Physs Letters 213, 181-188. (1993).

204. Xewiet P. Superplasticised concrete/ P. Xewiet, R. Rixom //J. Amer. ConcreteInst/ - 1977. – V.74, №5.

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ООО «ЛипецкНИЦстройпроект»

Д.В. Пак

2016 г.



## Технический акт внедрения

Мы, ниже подписавшиеся, комиссия в составе:

- от Липецкого государственного технического университета – заведующий кафедрой «Строительное материаловедение и дорожные технологии» д.т.н., проф. Гончарова М.А., д.т.н., проф. Бондарев Б.А., инженер Комаричев А.В.;

- от ООО «ЛипецкНИЦстройпроект» технический директор Кукуев Е.В.

составила настоящий акт о том, что в результате выполнения научно-исследовательских работ в период с 2013 по 2015 г.г., под руководством ответственного исполнителя Комаричева А.В. составы цементных инъекционных композиций для заделки трещин на основе отходов металлургии (конвертерных шлаков и продуктов обточки стали абразивным инструментом) были внедрены при проектировании дорожной одежды по ул. Московская в г. Липецке.

ФГБОУ «Липецкий государственный  
технический университет»

ООО «ЛипецкНИЦстройпроект»

Заведующий кафедрой  
«Строительное материаловедение и  
дорожные технологии»

Технический директор

д.т.н., проф.  Гончарова М.А. Кукуев Е.В.д.т.н., проф.  Бондарев Б.А.Инженер  Комаричев А.В.



# общество с ограниченной ответственностью ПРОМИЗДЕЛИЯ

ИНН 4823012270 Адрес: 398600 г. Липецк, ул. Алмазная, 10  
Тел. /факс (4742) 23-75-75; ZSK 10 @ Mail.ru; www.ZSK48.ru  
Расчетный счет № 40702810500000000374  
в ПАО «Липецккомбанк» г. Липецка  
Кор/счет: 30101810700000000704 БИК 044206704

УТВЕРЖДАЮ  
Зам. директора  
ООО «Промизделия»  
В.А. Гугнин  
«20» 01 2016г.

## Технический акт внедрения.

Мы, ниже подписавшиеся, комиссия в составе:

- от ФГБОУ ВПО «Липецкого государственного технического университета» - заведующий кафедрой «Строительное материаловедение и дорожные технологии» д.т.н., проф. Гончарова д.т.н., проф. Корнеев А.Д., инженер Комаричев А.В.;
- от ООО «Промизделия» технический директор Головки А.Д.

составили настоящий акт о том, что в результате выполнения научно-исследовательских работ в период с 2013 по 2015 г.г., под руководством ответственного исполнителя Комаричева А.В. составы цементных инъекционных композиций для заделки трещин на основе отходов металлургии (конвертерных шлаков и продуктов обточки стали абразивным инструментом) были внедрены при строительстве склада готовой продукции в Липецкой обл., с. Косыревка.

ФГБОУ «Липецкий государственный

Технический университет»

Заведующий кафедрой

«Строительное материаловедение

и дорожные технологии»

Д.т.н., проф. Гончарова М.А.

Д.т.н., проф. Корнеев А.Д.

Инженер Комаричев А.В.

ООО «Промизделия»

Технический директор

Головки А.Д.



Общество с ограниченной ответственностью  
«Хай-тек»

Юридический адрес: 603089, г. Нижний Новгород, ул. Полтавская, д. 30, пом. 2, оф. 9  
ИНН: 5262310337 КПП: 526201001 ОГРН: 1145262014700  
р/с 40702810135000000335 в ОТДЕЛЕНИЕ №8593 СБЕРБАНКА РОССИИ  
к/с 30101810800000000604 БИК 044206604  
Тел.: +7(4742) 900-686



УТВЕРЖДАЮ  
Генеральный директор  
ООО «Хай-Тек»  
О.А. Смагина  
2016 г.

### Технический акт внедрения

Мы, ниже подписавшиеся, комиссия в составе:

- от ФГБОУ ВПО «Липецкого государственного технического университета» – заведующий кафедрой «Строительное материаловедение и дорожные технологии» д.т.н., проф. Гончарова М.А., д.т.н., проф. Корнеев А.Д., инженер Комаричев А.В.;

- от ООО «Хай-Тек» главный инженер Нивис Р.

составила настоящий акт о том, что в результате выполнения научно-исследовательских работ в период с 2013 по 2015 г.г., под руководством ответственного исполнителя Комаричева А.В. составы цементных инъекционных композиций для заделки трещин на основе отходов металлургии (конвертерных шлаков и продуктов обточки стали абразивным инструментом) были внедрены при строительстве и реконструкции 13-ти этажных 124-квартирных домов из монолитного железобетона в г.Липецке по улице Свиридова.

ФГБОУ «Липецкий государственный  
технический университет»

Заведующий кафедрой

«Строительное материаловедение и  
дорожные технологии»

д.т.н., проф.  Гончарова М.А.

Д.т.н., проф.  Корнеев А.Д.

Инженер  Комаричев А.В.

ООО «Хай-Тек»

Главный инженер

 Нивис Р.



УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор ЛГТУ

Ю.П. Качановский

04 2016 г.



## АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов научно-исследовательской работы  
в учебный процесс

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационных исследований аспиранта кафедры «Строительное материаловедение и дорожные технологии» Комаричева А.В. в части разработанных составов цементных инъекционных композиций для заделки трещин на основе отходов металлургии (конвертерных шлаков и продуктов обточки стали абразивным инструментом) внедрены в учебный процесс.

1. **Вид внедряемых результатов:** научно-обоснованные данные по оптимизации составов инъекционных строительных композитов с использованием конвертерных шлаков в качестве ферромагнитного наполнителя, использующиеся при подготовке специалистов по направлению 08.03.01 «Строительство».
2. **Форма внедрения:** издана монография «Магнитные цементные тампонажные композиционные материалы», которая рекомендована в качестве используемой литературы в рабочих программах по дисциплинам «Строительные материалы», «Технология бетона, строительных изделий и конструкций», «Химия отходов», «Материаловедение».
3. **Эффективность практической реализации:** повышение качества подготовки специалистов по направлению 08.03.01 «Строительство».

Зав. кафедрой

«Строительное материаловедение  
и дорожные технологии»

М.А. Гончарова